

SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS ATMOSFÉRICOS PARA
ESTUDO DE PARQUES EÓLICOS: ESTUDO COMPARATIVO
DOS SOFTWARES OPENFOAM E WINDIE

Ricardo Faria

Dissertação submetida para a obtenção do grau de
Mestre em Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

Novembro de 2014

Relatório da Unidade Curricular Dissertação do 2º ano do Mestrado em Energias
Sustentáveis.

Candidato: Ricardo Jorge Agrela Faria, N° 1070609, 1070609@isep.ipp.pt
Orientação Científica: José Carlos Pereira Lopes da Costa, loc@isep.ipp.pt

Mestrado em Energias Sustentáveis
Departamento de Engenharia Mecânica



Novembro de 2014

Quero dedicar este trabalho à minha família que sempre me apoiou em todos os momentos da minha vida

Agradecimentos

Quero agradecer à minha família, principalmente aos meus pais, por suportarem esta jornada no ensino superior. Agradecer ao Eng. Lopes da Costa por estar sempre disponível para ajudar, esclarecimento de dúvidas e por ter depositado a sua confiança em mim na realização desta tese. O meu primo Miguel por ajudar e alertar sobre metodologias de Trabalho e conselhos sobre caminhos a seguir. O meu irmão Pedro e sua namorada Andreia, por estarem sempre presentes na minha vida, tal como o resto dos meus amigos e primos.

Resumo

A presente tese tem como principal objetivo a comparação entre dois softwares de CFD (*Computer Fluid Dynamics*) na simulação de escoamentos atmosféricos com vista à sua aplicação ao estudo e caracterização de parques eólicos. Os softwares em causa são o *OpenFOAM* (*Open Field Operation and Manipulation*) - *freeware open source* genérico - e o *Windie*, ferramenta especializada no estudo de parques eólicos. Para este estudo foi usada a topografia circundante a um parque eólico situado na Grécia, do qual dispúnhamos de resultados de uma campanha de medições efectuada previamente.

Para este fim foram usados procedimentos e ferramentas complementares ao *OpenFOAM*, desenvolvidas por [da Silva Azevedo \(2013\)](#) adequados para a realização do pré-processamento, extração de dados e pós-processamento, aplicados na simulação do caso pratico.

As condições de cálculo usadas neste trabalho limitaram-se às usadas na simulação de escoamentos previamente simulados pelo software *Windie*: condições de escoamento turbulento, estacionário, incompressível e em regime não estratificado, com o recurso ao modelo de turbulência *RaNS* (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) $k - \varepsilon$ atmosférico.

Os resultados de ambas as simulações - *OpenFOAM* e *Windie* - foram comparados com resultados de uma campanha de medições, através dos valores de *speed-up* e intensidade turbulenta nas posições dos anemómetros.

Abstract

The main purpose of this work is the comparison between two CFD (*Computational Fluid Dynamics*) softwares, in a simulation of atmospheric flows over complex terrain, with application and characterization in wind farms. The softwares used are *OpenFOAM* (*Open Field Operation and Manipulation*) - *freeware open source* - and *Windie*, which is a tool specialized in atmospheric flows for wind farms projects. In this thesis was used a topography with a real wind farm already implemented, located in Greece, with a previously recorded measurements data. In this thesis was used additional procedures to *OpenFOAM*. Pre-processing and post-processing tools were used with *OpenFOAM*, those tools are already developed by [da Silva Azevedo \(2013\)](#) in his thesis. For data comparison we used previously simulations made in *Windie* software. Then used the same simulation conditions to perform the *OpenFOAM* simulations. Some of the conditions was turbulent, stationary, incompressible flow and non stratified regime, with RaNS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) atmospheric $k - \varepsilon$ model. The results of both simulations - *OpenFOAM* & *Windie* - were compared through *speed-up* and turbulent intensity with a previously measurements data, recorded from the located anemometers.

Conteúdo

Resumo	i
abstract	iii
Nomenclatura	xiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e objetivos do presente trabalho	1
1.2 Conteúdo da tese	1
1.3 Estado de Arte	2
1.4 Revisão bibliográfica	3
1.4.1 Camada Limite Atmosférica	3
1.4.2 Turbulência na Camada Limite Atmosférica	4
1.4.3 Estratificação	5
1.4.4 Rugosidade e Perfil de Velocidade	7
1.4.5 Topografia e Turbinas Eólicas	8
1.4.6 Modelação Turbulenta	9
1.5 Software OpenFOAM	10
1.6 Software Windie	13
2 Modelos Físicos Utilizados	15
2.1 Equações e Modelo RaNS	15
3 Ferramentas e Modelos Utilizados	17
3.1 Introdução	17
3.2 Sequência de Procedimentos Utilizados no <i>OpenFOAM</i>	17
3.3 Simplificações do Modelo Utilizado	18
3.4 Geração de Malhas	19
3.5 Condições de fronteira	20
3.6 Propriedades de Turbulência	22
3.7 Pós-Processamento	22
4 Simulação e Tratamento estatístico	25
4.1 Procedimentos	25
4.2 Descrição das topografias	25
4.3 Pré-Processamento	26

4.3.1	Geração das Malhas	26
4.3.2	Condições de Fronteira e Modelo de Turbulência	27
4.4	Preparação Ambiente em <i>OpenFOAM</i>	28
4.4.1	fvSchemes	29
4.4.2	fvSolution	29
4.5	Pós Processamento	30
4.6	Análise e Discussão de Dados das Medições	31
4.6.1	Estudo dos Dados dos Anemómetros	31
4.6.2	Comparação do Campo de Velocidade	36
4.6.3	Comparação dos Perfis de Velocidade nos Mastros	38
4.6.4	Comparação do campo de Turbulência	44
4.6.5	Comparação dos Perfis de Intensidade Turbulenta	46
4.6.6	Zona de Recirculação na Esteira do Monte	54
4.7	Discussão dos Resultados	55
5	Conclusões e Trabalho Futuro	57
5.1	Conclusões	57
5.2	Trabalho futuro	57
	Bibliografia	59
A	Pastas, ficheiros e seu conteúdo Pré-processamento, Pós-processamento e OpenFOAM	61
A.1	Disposição das pastas e ficheiros	61
A.2	Conteúdo dos ficheiros da pasta <i>/_preproc</i>	63
A.3	Conteúdo dos ficheiros da pasta <i>/surf</i>	64
A.4	Ficheiros de configuração da pasta <i>/system</i>	69
A.5	Ficheiros de configuração da pasta <i>/constant</i>	75
B	Código R	77
B.1	Disposição das pastas e ficheiros	77

Lista de Tabelas

2.1	Coeficientes para o modelo de $k - \varepsilon$	16
3.1	Campos dos patches das condições de fronteira.	19
3.2	Condições de fronteira para o campo de pressão, p	20
3.3	Condições de fronteira para o campo de velocidade, u	22
3.4	Condições de fronteira para o campo de k e ε	22
4.1	Dimensões da malha da topografia na Grécia.	26
4.2	Coeficientes para o modelo Atmosférico de $k - \varepsilon$	28

Lista de Figuras

1.1	Os vários campos da camada limite atmosférica. De <i>ecmwf</i>	4
1.2	Distribuição energia cinética turbulenta a partir do solo. O comprimento da rugosidade z_0 , é a altura onde a velocidade iguala a 0.	5
1.3	Energia cinética turbulenta num estado quase uniforme, homogénea na horizontal. ε , dissipação viscosa; T , transporte turbulento; P , transporte de Pressão; B , produção de flutabilidade. Fonte Wyngaard and Kosovic (2010)	6
1.4	Efeito térmico sobre o perfil de velocidade do vento. Adaptado de <i>ecmwf</i>	7
1.5	Efeito da rugosidade do solo sobre o perfil de velocidade do vento. Adaptado de <i>ecmwf</i>	8
1.6	Efeito de diferentes rugosidades sobre o perfil de velocidade vertical do vento, assumindo velocidade constante. De Gasch and Twele (2002)	9
1.7	Efeito da turbulência sobre inclinação na topografia. De Gasch and Twele (2002).	10
1.8	Direção oblíqua do vento, aplicada numa turbina eólica. De Gasch and Twele (2002).	10
1.9	Variações da intensidade do vento, aplicadas na turbina eólica. De Gasch and Twele (2002).	11
1.10	Contabilização VS compatibilização para modelação turbulenta.	11
1.11	Estrutura dos ficheiros do OpenFOAM. De OpenFOAM.	12
1.12	Atributos das <i>patches</i> do <i>OpenFOAM</i> . De OpenFOAM.	13
4.1	Resultado da malha da topografia com refinamento maior no centro.	26
4.2	Refinamento, pormenorizado, da malha com rácio vertical de $R=194,76$ a partir do solo.	27
4.3	Vista sobre a malha final	27
4.4	Perfil de velocidade à entrada (<i>inlet</i>) do domínio computacional.	28
4.5	Perfil de turbulência (k) à entrada, <i>inlet</i> , do domínio computacional.	29
4.6	Posição dos mastros com uma rotação de 60° no sentido horário e vista de Norte.	30
4.7	Posição dos mastros vista no <i>Google Earth</i>	31
4.8	Direções e incidência do vento a 10 m de altura - Mastro 305.	32
4.9	Direções e incidência do vento a 30 m de altura - Mastro 305.	32

4.10	Comparação da frequência das velocidades para todas as direções a 10 m e 30 m do solo - Mastro 305.	33
4.11	Direções e incidência do vento a 10 m de altura - Mastro 3011.	33
4.12	Direções e incidência do vento a 31 m de altura - Mastro 3011.	34
4.13	Comparação da frequência das velocidades para todas as direções a 10 m e 31 m do solo - Mastro 3011.	34
4.14	Direções e incidência do vento a 10 m de altura - Mastro 30R.	35
4.15	Direções e incidência do vento a 31 m de altura - Mastro 30R.	35
4.16	Comparação da frequência das velocidades para todas as direções a 10 m e 31 m do solo - Mastro 30R.	36
4.17	Campo da velocidade horizontal ao longo da topografia. Corte na direção Este-Oeste, visto de Norte para sul (vento de 90°), dos resultados da simulação no <i>OpenFOAM</i>	37
4.18	Campo da velocidade horizontal ao longo da topografia. Corte na direção Este-Oeste, visto de Norte para sul (vento de 90°), dos resultados da simulação no <i>Windie</i>	37
4.19	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 0°.	38
4.20	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 30°.	39
4.21	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 60°.	39
4.22	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 90°.	40
4.23	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 120°.	40
4.24	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 150°.	41
4.25	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 180°.	41
4.26	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 210°.	42
4.27	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 240°.	42
4.28	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 270°.	43
4.29	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 300°.	43
4.30	Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 330°.	44
4.31	Campo de Intensidade Turbulenta ao longo da topografia. Corte na direção Norte-Sul, vento de 0°), dos resultados da simulação no <i>OpenFOAM</i>	45

4.32	Campo de Intensidade Turbulenta ao longo da topografia. Corte na direção Norte-Sul, vento de 0°), dos resultados da simulação no <i>Winde</i>	45
4.33	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 0°.	46
4.34	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 30°.	47
4.35	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 60°.	47
4.36	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 90°.	48
4.37	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 120°.	48
4.38	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 150°.	49
4.39	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 180°.	49
4.40	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 210°.	50
4.41	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 240°.	50
4.42	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 270°.	51
4.43	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 300°.	51
4.44	Perfil da Intensidade Turbulenta, <i>IT</i> . Direção 330°.	52
4.45	Malha final do <i>Winde</i> para a direção 000.	52
4.46	Malha final do <i>Winde</i> para a direção 300.	53
4.47	Dados de turbulência representado no solo e linhas de velocidade e direção do vento, para a direção 0°.	54
4.48	Dados de turbulência representado no solo e linhas de velocidade e direção do vento, para a direção 30°.	54

Nomenclatura

Caracteres Romanos

C_μ, C_1, C_2	constantes do modelo $k - \varepsilon$
cp	calor específico a pressão constante
g	módulo do vector aceleração da gravidade
IT	Intensidade Turbulenta
N_x, N_y, N_z	números de nós nas três direção do domínio computacional
P, p	pressão
Pr	número de Prandtl
R	rácio da dimensão entre o primeiro e o último volume de controlo
Re	número de Reynolds
ΔS	<i>speed-up</i>
T	temperatura
t	tempo
U, u	componente segundo x do vetor velocidade
U_i, u_i	campo de velocidade
$-\overline{u'_i u'_j}$	tensões de Reynolds
u^*	velocidade de fricção
v	componente segundo y do vetor velocidade
V_h	módulo das componentes horizontais do vetor velocidade
W, w	componente segundo z do vetor velocidade
x	componente do sistema de coordenadas cartesiano
x^i	coordenadas de um sistema de coordenadas cartesiano
x^i	componente x da coordenada i
y	componente do sistema de coordenadas cartesiano
z	componente do sistema de coordenadas cartesiano
z_0	escala de comprimento dos elementos rugosos

Caracteres Gregos

δ	espessura de uma camada limite; campo de deslocamentos
δ_{ij}	tensor de Kronecker
ε	parâmetro da teoria do <i>Triple-Deck</i> ; taxa de

	destruição da energia cinética da turbulência
θ	temperatura potencial
k	constante de von Kármán
μ	viscosidade dinâmica
μ_t	coeficiente de difusão da turbulência
ν	viscosidade cinemática
ρ	densidade
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	constantes do modelo $k - \varepsilon$
σ_{ij}	tensor das tensões de Reynolds
σ_k	coeficiente do modelo $k - \varepsilon$
τ	tensor de corte
Φ, ϕ	orientação do vector velocidade; escalar genérico

Operadores

$\overline{(\)}$	valor médio
$(\)^*$	quantidade adimensional
∂/∂	derivada parcial
d/d	derivada total
Δ	diferença
\rightarrow	tende para

Abreviaturas

DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
Max, max	máximo
Min, min	mínimo
RaNS	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e objetivos do presente trabalho

Este trabalho tem como principal objetivo a comparação de simulações de escoamento atmosférico, efetuadas com os mesmos parâmetros físicos, entre dois diferentes softwares: o *OpenFOAM* 2.3 e o *Windie*. Trata-se de dois softwares de Mecânica de Fluidos Computacional (*CFD - Computational Fluid Dynamics*), que modelizam escoamentos utilizando o método dos volumes finitos.

Pretendo também, como objetivo pessoal ao fazer esta tese, aprofundar a aprendizagem do software *OpenFoam*, pois este é um software *open source* que poderá apresentar um enorme potencial nesta área em estudo tanto para fim comercial ou acadêmico. Esse é um fator muito importante a ter em conta nos dias de hoje, pois as empresas começam a dar valor ao software *open source*. Para além de se tratar de um software gratuito, permite que o seu código seja modificado para vários fins e com a possibilidade de desenvolver diversos *solvers*. Este meu interesse teve origem nas aulas de Mecânica dos Fluidos Computacional, unidade curricular do Mestrado em Energias Sustentáveis do DEM-ISEP, onde aprendi a base de funcionamento do *OpenFOAM*, e obtive também alguma sensibilidade na construção de malhas de diferenças finitas, esquemas de convecção e modelação turbulenta. Fiquei fascinado com o potencial desta ferramenta e a hipótese de modelar diferentes cenários, reais ou ideais, e diversos casos de estudo. Esta tese em conjunto com as referidas aulas constituíram os primeiros passos a dar para o uso mais profundo do *OpenFOAM*.

1.2 Conteúdo da tese

Para além deste capítulo introdutório, este trabalho está dividido da seguinte forma:

O capítulo 2 faz referência aos modelos matemáticos e técnicas numéricas específicas para escoamentos atmosféricos. Faz também uma revisão à estrutura e métodos usados no *OpenFOAM*, seus modelos físicos (nomeadamente os modelos de turbulência), condições da camada limite da atmosfera, das fronteiras da malha.

O capítulo 3 fala sobre os processos e ferramentas que foram usadas no *OpenFOAM*

para pré-processamento, processamento das simulações e pós-processamento (extração de dados do escoamento atmosférico sobre a topografia).

No capítulo 4, são apresentados dados topográficos e de condições de vento usadas nas simulações em *OpenFOAM* sobre a topografia de referência. Também é feita a comparação dos seus resultados com resultados das campanhas de medições no local e os resultados obtidos por simulações em *Windle* para a mesma topografia.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

1.3 Estado de Arte

O conceito de camada limite, é introduzido num artigo publicado por [Gresho and Lee \(1904\)](#), assinado por ele e seus alunos. Não teve fácil aceitação na comunidade científica, sendo necessárias ainda quase três décadas para que o conceito de camada limite viesse a ser aceite e passar a ser estudado por um número significativo de investigadores, em diversos países, até vir a se tornar um dos campos mais importantes da mecânica dos fluidos e da transferência de calor.

O estudo e simulação de escoamentos atmosféricos sobre topografia de média e alta complexidade, tem muitas finalidades, tal como a análise e otimização do posicionamento de turbinas eólicas para aproveitamento da energia do vento. Este é um dos maiores desafios de estudo nesta área devido à dificuldade e custos de simular/reproduzir a física da camada limite atmosférica num túnel de vento.

Outras aplicações das simulações CFD - algumas delas mais usuais em engenharia - são o estudo da dispersão de poluentes em grandes cidade ou zonas industriais, estudo de pressão do ar sobre edifícios, escoamento de fluido sobre carros, motos, aviões e etc, para cálculos de coeficientes de arrasto e sustentação.

O primeiro estudo detalhado sobre Escoamento da camada limite atmosférica sobre colinas isoladas de baixo declive, pertence a [Jackson and Hunt \(1975\)](#), que desenvolveu uma teoria linear analítica sobre este tipo de escoamentos.

[Taylor \(1977\)](#), [Walmsley et al. \(1982\)](#), [Raithby et al. \(1987\)](#) entre outros, fizeram estudos numéricos apresentando melhorias e mais tarde usaram técnicas de elementos finitos a três dimensões, sendo assim os primeiros casos de estudo em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de escoamentos atmosféricos sobre topografia complexa.

Também foram executados estudos experimentais de escoamento de fluídos em túneis de vento do [Teunissen et al. \(1987\)](#) que ainda são utilizados nos dias de hoje tal como os estudos experimentais de [Taylor and Teunissen \(1985\)](#) e [Mason and King \(1985\)](#).

A deficiência dos modelos criados até à altura para previsão de aspetos físicos do fluido, tal como redução da velocidade e separação turbulenta do fluido sobre uma colina motivou ao desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas com capacidades não lineares, recorrendo a modelos de RaNS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*). Um desses modelos criados, tem a sua origem em [Palma et al. \(2003\)](#), que usa sistema de coordenadas adaptadas ao terreno, e um modelo com duas equações k e ε , modelo turbulento que aumentou a precisão na determinação do *speed-up* sobre colinas e a sua zona de separação do fluido. Os benefícios

e limitações das equações k e ε foram estudados por [et al. \(2000\)](#) que testou diferentes modelos de turbulência, e [F. A. Castro and Lopes \(2003\)](#) que estudou a importância de grelhas numéricas da caracterização espacial e parâmetros de rugosidade sobre topografia.

Estamos nesta altura a viver uma realidade em que poder computacional é cada vez maior, isto vai fazer com que novas técnicas de simulação que são mais eficientes se tornem capazes de realizar em tempo útil. Por isso o LES (*Large-eddy Simulation*), poderá ser uma técnica cada vez mais usual, tendo em conta que esta apresenta melhores e mais realistas valores de velocidade e turbulência nas simulações realizadas. Já foram feitas simulações de escoamento estratificado, obtendo e confirmando o anterior dito: melhorias significativas em comparação ao às simulações feitas em RaNS.

Para a avaliação dos recursos eólicos sobre uma topografia, com aplicação de escoamentos atmosféricos, existem outros códigos de simulação, tal como modelos lineares RaNS existente no *WAsP* e *MS-Micro/3*, enquanto o *WindSim* e o *Windie* usam modelos não lineares URaNS, que têm a capacidade de simulação de escoamentos atmosféricos com inclusão da temperatura, rugosidade e acoplamento de dados atmosféricos da meso-escala.

O *OpenFOAM* foi inicialmente desenvolvido na ICL (Imperial College of London). É um código numérico *open source*, que pode ser facilmente modificada, em que estão embebidos vários modelos de física que estão a ser desenvolvidos e otimizados para aplicações CFD.

Os modelos *open source* não são ainda muito usados a nível industrial para simulação atmosférica sobre topografias complexas, embora a tendência seja de se inverter a situação.

1.4 Revisão bibliográfica

1.4.1 Camada Limite Atmosférica

A camada limite atmosférica é a região da troposfera terrestre mais próxima da superfície, com uma altura média entre 0,5 a 3 quilómetros. Dentro desta predomina um regime de escoamento turbulento, pelo qual as simulações serão baseadas. Segundo [Stull \(1988\)](#) essa altura média é variável no tempo e espaço, tendo em conta que os parâmetros que o/a influenciam são o coeficiente de arrasto, evaporação, transferência de calor, emissões de poluentes e a orografia do terreno. Este classifica a camada limite atmosférica, em camada limite convectiva e camada limite estável, como podemos ver na figura [1.1](#)

Em mecânica dos fluidos, a camada limite é a camada de fluido nas imediações de uma superfície delimitadora, fazendo-se sentir os efeitos difusivos e a dissipação da energia mecânica. O conceito foi introduzido no início do século XX, por *Ludwig Prandtl* para descrever a região de contacto entre um fluido incompressível em movimento relativamente a um sólido, que no nosso caso será a topografia.

Quando um objeto se move através de um fluido, ou um fluido se move em redor de um objeto, o movimento das moléculas do fluido perto deste é perturbado, fazendo com que estas movam-se em redor deste, gerando forças aerodinâmicas. A magnitude dessas forças depende da forma e velocidade do objeto, assim como da massa, viscosidade e compressibilidade do fluido. Para modelizar corretamente os efeitos, recorre-se a parâmetros

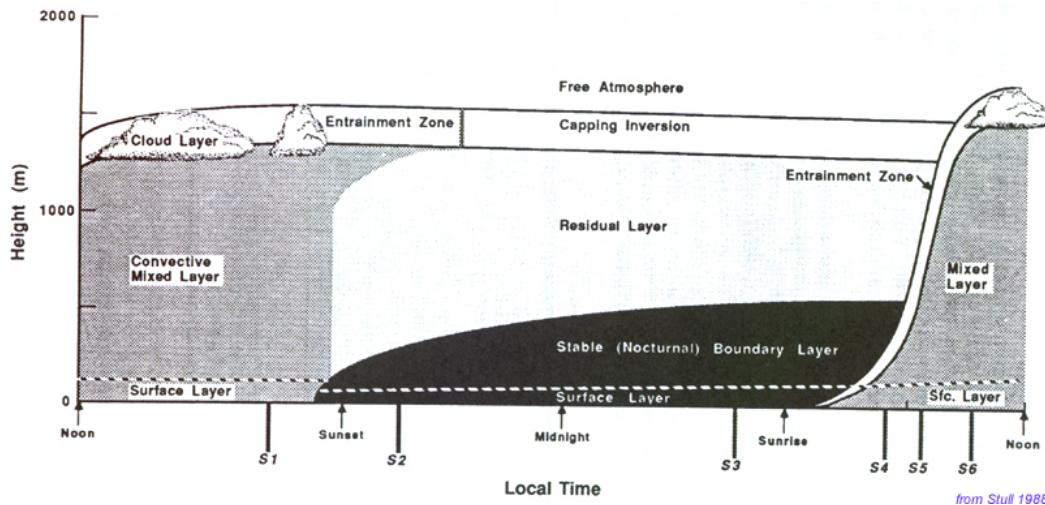


Figura 1.1: Os vários campos da camada limite atmosférica. De [ecmwf](#).

adimensionais que relacionam as componentes referidas, como o número de Reynolds.

Este conceito é de extrema importância para o dia a dia na engenharia, fornecendo explicações físicas para o comportamento de escoamentos de fluidos como o ar ou a água, em circunstâncias de aplicação pertinentes, em campos tão diferentes como nos escoamentos atmosféricos, onde a camada limite planetária é a camada de ar perto do solo afetado pelo calor diurno, a humidade.

As camadas limites laminares podem ser vagamente classificadas de acordo com sua estrutura e as circunstâncias em que estas são criadas. A camada fina que se desenvolve sobre um corpo em movimento é um exemplo de uma camada limite de Stokes, enquanto que a camada limite de Blasius refere-se a uma similaridade bem conhecida de uma placa plana fixa colocada num fluxo que se aproxima unidirecionalmente. Quando um fluido gira e forças viscosas são equilibradas pelo efeito de Coriolis, forma-se uma camada de Ekman. Na teoria da transferência de calor, ocorre uma camada de fronteira térmica, isto significa que uma superfície pode ter múltiplos tipos de camada limite no mesmo instante.

1.4.2 Turbulência na Camada Limite Atmosférica

Quanto à turbulência na camada limite atmosférica, [Stull \(1988\)](#) enumera as principais causas para sua existência:

- Aquecimento do solo devido à radiação solar, que faz com que haja movimentação ascendente de massa de ar.
- Força de arrasto do movimento de ar no solo, que causa o desenvolvimento deste regime, sendo este o fator que mais influencia a turbulência.
- Obstáculos no solo, tal como topografia com índices de rugosidade alta, árvores ou edifícios, causam o desenvolvimento do regime turbulento.

A energia cinética do regime turbulento tende atingir o seu máximo mais próximo do solo. Os diferentes mecanismos de transferência destes foram identificados por [Wyngaard and Kosovic \(2010\)](#), como mostra a figura 1.2, que mostra claramente os desvios de valor de velocidade maior, junto ao solo.

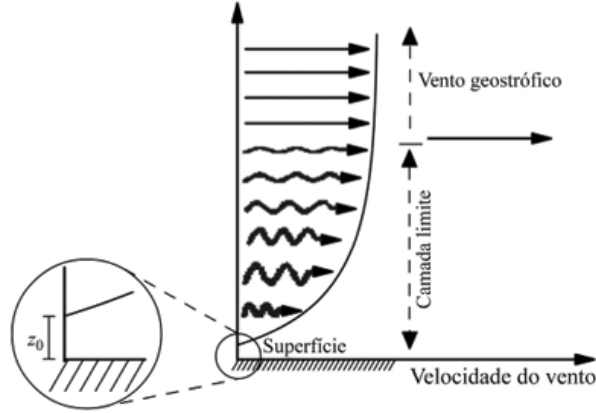


Figura 1.2: Distribuição energia cinética turbulenta a partir do solo. O comprimento da rugosidade z_0 , é a altura onde a velocidade iguala a 0.

A camada limite atmosférica estável representa uma perda de energia cinética turbulenta, sendo a única fonte de turbulência a energia mecânica, esta precisa de extrair energia cinética do movimento da massa de ar para continuar a fluir.

Numa camada limite atmosférica convetiva a energia cinética turbulenta, provém da flutuabilidade e a maior parte desta é dissipada no solo, como mostra a figura 1.3

1.4.3 Estratificação

Numa atmosfera estratificada a temperatura decresce adiabaticamente quanto maior a altura, pela dada equação 1.1

$$\Gamma_d = \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{g}{c_p}. \quad (1.1)$$

Este fenómeno acontece devido à superfície da terra que apresenta uma diferença de temperatura com o ar acima. Se uma parcela de ar estiver mais quente que o ar à sua volta, vai-se originar forças de flutuabilidade, fazendo que essa parcela de ar quente suba e a sua pressão baixe, resultando assim um decréscimo de temperatura e densidade desta, devido à sua expansão. Assunto estudado por [Oke](#), que chegou à expressão

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \quad (1.2)$$

em que θ é a temperatura potencial.

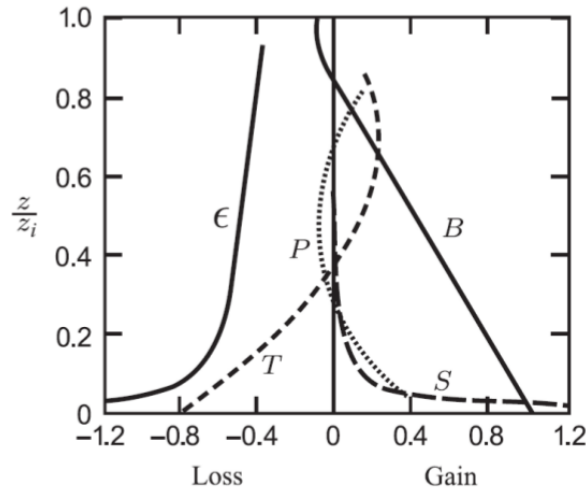


Figura 1.3: Energia cinética turbulenta num estado quase uniforme, homogênea na horizontal. ϵ , dissipação viscosa; T , transporte turbulento; P , transporte de Pressão; B , produção de flutabilidade. Fonte [Wyngaard and Kosovic \(2010\)](#)

A partir desta equação pode ser avaliada a estabilidade da estratificação atmosférica, seguindo os seguintes parâmetros, que podem ser comparados graficamente na figura 1.4

- $\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$, então a atmosfera é neutralmente estratificada, de acordo com [Wyngaard and Kosovic \(2010\)](#). Situação que raramente acontece na superfície pois uma pequena variação de temperatura pode causar efeitos de flutabilidade. Só pode existir turbulência através de interferência mecânica, provinda da fricção com o solo
- $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$, a atmosfera está estavelmente estratificada, isto significa que uma parcela de ar suspensa no ar está mais densa e a uma temperatura abaixo ao ar que a rodeia, logo causa menos efeitos de flutuabilidade, tendendo sempre a uma posição de equilíbrio. A velocidade vertical do vento neste caso é amortecida.
- $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$, a atmosfera está instavelmente estratificada, este caso refere que uma parcela de ar suspensa no ar que está a uma temperatura maior que o envolvente, causando aceleração desta no sentido ascendente e causando mais efeitos de flutuabilidade. A velocidade vertical do vento neste caso é maior.

Sendo o efeito de flutuabilidade a maior causa de turbulência na camada limite atmosférica, a estabilidade de estratificação térmica tem grande impacto no perfil de velocidade do vento e comportamento da turbulência.

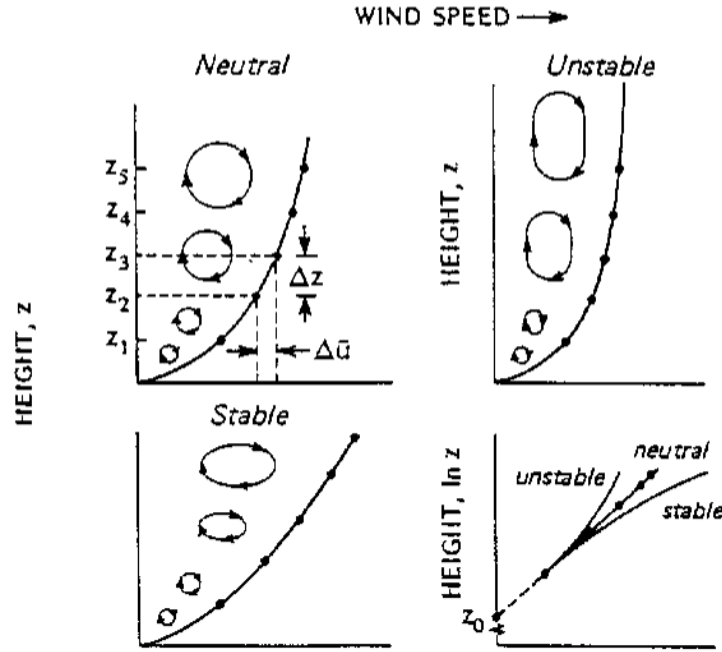


Figura 1.4: Efeito térmico sobre o perfil de velocidade do vento. Adaptado de [ecmwf](#).

1.4.4 Rugosidade e Perfil de Velocidade

O perfil de velocidade do vento para escoamentos atmosféricos, é um perfil logarítmico, em que no solo a velocidade deste é de zero e a uma certa altura passa a ser quase uma constante, como mostra a figura 1.5. O perfil pode ser dado pela seguinte expressão logarítmica 1.4, desenvolvida por *Prandtl*. A variação da velocidade com a altura vertical z , é dada em função da velocidade de fricção (u^*), da constante de von Karmán (k), e do comprimento de rugosidade (z_0). O comprimento de rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero, e depende do relevo e obstáculos encontrados na superfície. Contudo, o perfil real de velocidades na vertical depende também da estratificação de temperatura e pressão na atmosfera.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (1.3)$$

sendo a fórmula da velocidade de fricção u^* resultante de

$$\tau = \rho u_*^2. \quad (1.4)$$

Isto representa que quanto maior o parâmetro de, z_0 , menor será a velocidade de vento à mesma altura de z . Foi estudado por, *Elliot* em 1958 o impacto da rugosidade no perfil de velocidade do vento, em que concluiu que a perturbação na velocidade, ΔU_r , é negativa de uma superfície lisa a uma rugosa e positivo numa superfície rugosa a uma lisa.

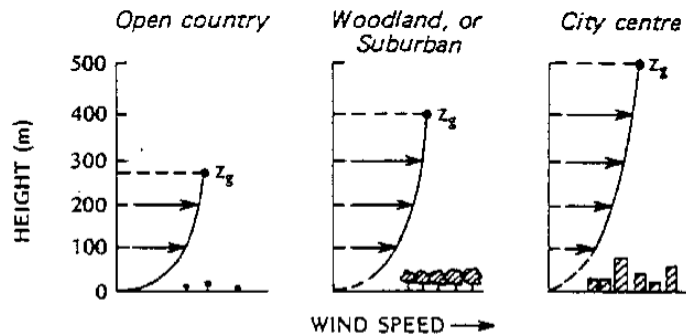


Figura 1.5: Efeito da rugosidade do solo sobre o perfil de velocidade do vento. Adaptado de [ecmwf](#).

1.4.5 Topografia e Turbinas Eólicas

O estudo desta matéria tenta prever o recurso do vento com um certo nível de incerteza, num escalar espacial e temporal, de modo a encontrar os melhores pontos para instalação das turbinas eólicas, explorando ao máximo a energia a obter nestas. A quantidade de vento é tão importante como a sua qualidade, onde topografias de micro-escala têm um grande impacto.

- A energia contida na **velocidade horizontal** do vento varia ao cubo da velocidade média deste. Elevações na topografia causam aumentos de velocidade conhecidos como *speed-up*, isto acontece devido ao ar ser estrangulado nessa elevação. [Taylor and Lee \(1987\)](#) também mencionam a possibilidade da redução em 30% do *speed-up* em casos de estratificação instável e aumentado em 50% nos casos de estratificação estável.

Como mencionado atrás no cap. 1.4.4, a rugosidade tem um grande impacto sobre o Perfil de Velocidade, que traduz numa diferença da velocidade do vento na horizontal, como podemos ver na figura 1.6.

- **Turbulência** é definida como o rácio entre $\overline{u_t}$ e σ_i . Esta diminui o tempo de vida da turbina, causando fadiga às pás desta. A criação de turbulência, acontece após as passagens destas nas pás e pode ter causa natural devido à rugosidade e inclinação na topografia, como mostra a figura 1.7.
- A **direção oblíqua** do vento acontece também devido à inclinação da topografia, que faz com que as pás fiquem expostas a variações do ângulo de incidência do vento sobre estas aumentando a carga a estas e flexão do rotor, como mostra a figura 1.8.
- A **variação de velocidade** do vento por metro de comprimento, origina a cargas variadas sobre as pás causando a fadiga destas. O gradiente de velocidade aumenta, no entanto traduz-se para uma diminuição da velocidade a uma certa altura, causando um perfil de velocidade sobre as pás, não adequado, como mostra a fig. 1.9

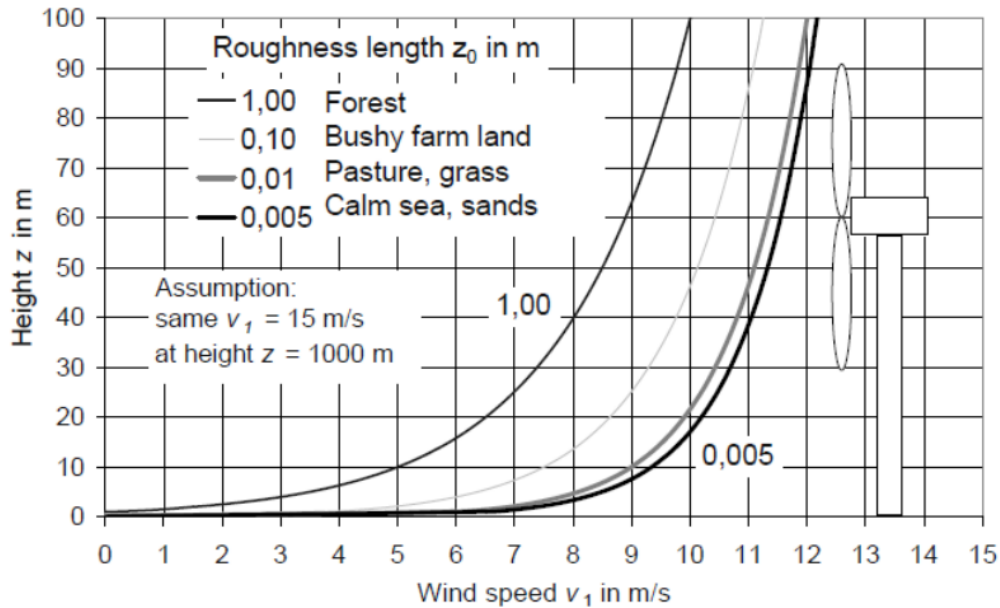


Figura 1.6: Efeito de diferentes rugosidades sobre o perfil de velocidade vertical do vento, assumindo velocidade constante. De [Gasch and Twele \(2002\)](#)

1.4.6 Modelação Turbulenta

As soluções numéricas para problemas de escoamento turbulento podem ser conseguidas através de várias aproximações, com maior ou menor descrição no detalhe das características do escoamento. Atualmente existe uma grande variedade de modelos de turbulência, cada um com as suas vantagens e desvantagens e não há um modelo que possa ser aplicado adequadamente a todo o tipo de escoamentos.

A simulação turbulenta pode ser abordada pelo método DNS (*Direct Numerical Simulation*) em que todas as escalas de comprimento (a três dimensões) e tempo (transientes), são resolvidas de modo a determinar o campo de velocidade $U(x, t)$. No entanto, para a simulação em DNS, o poder computacional aumenta imenso, uma vez que a malha tem que acomodar todas as escalas de turbulência relevantes. Considerando o atual poder computacional esta é apenas usado para escoamentos de baixo número de *Reynolds*.

Pode ser também abordada por simulação em LES, onde as equações de velocidade, são filtradas, representando movimentos turbulentos em larga escala, pois esses movimentos em escalas menores não são resolvidas diretamente, no entanto o modelo tem equações que incluem esses pequenos efeitos em escalas maiores.

Os modelos de turbulência envolvem uma média das equações de Navier-Stokes, técnica conhecida como RaNS (*Reynolds averaged Navier-Stokes*), que têm uma precisão razoável na previsão do escoamento, sendo estes modelos muito estudados nos últimos anos. Entretanto, nas equações do RaNS aparecem flutuações turbulentas, termo chamado de *Reynolds stresses* $-\overline{u'_i u'_j}$, que podem ser obtidos por dois métodos diferentes:

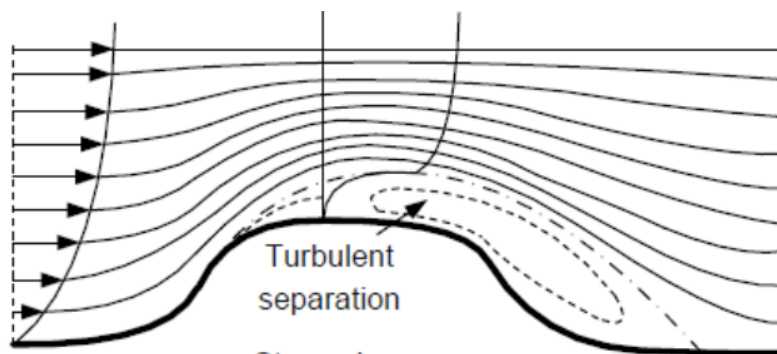


Figura 1.7: Efeito da turbulência sobre inclinação na topografia. De [Gasch and Twele \(2002\)](#).

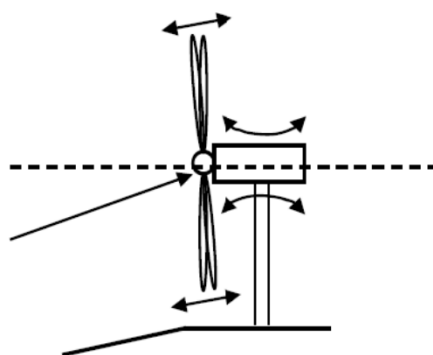


Figura 1.8: Direção oblíqua do vento, aplicada numa turbina eólica. De [Gasch and Twele \(2002\)](#).

- Para um modelo de viscosidade turbulenta, que pode ser obtido da energia cinética turbulenta k ou o rácio de dissipação ε .
- De equações de transporte modeladas, conhecidas como os modelos de *Reynolds stresses*.

Assim sendo, o RaNS e o LES são duas abordagens que estão ao nosso alcance, nos dias de hoje, para simulação de escoamentos tendo em conta o rácio tempo/qualidade de simulação. Na figura 1.10 podemos ver uma pequena comparação entre o grau de modelação nos três modelos e poder computacional requerido para modelação turbulenta.

1.5 Software OpenFOAM

O *OpenFOAM*, começou por ser desenvolvido na década de 80 no *Imperial College of London*, e foi lançado em 2004 é um software de fonte aberta, baseado em C++. Este contém um pacote com vários *Solvers* numéricos físicos. Distribuição do *GNU General Public License by the OpenFOAM Foundation*.

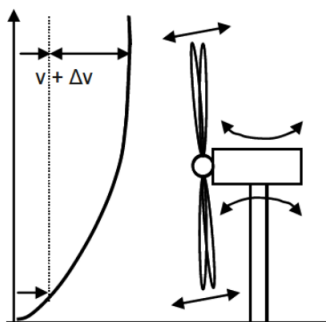


Figura 1.9: Variações da intensidade do vento, aplicadas na turbina eólica. De [Gasch and Tvele \(2002\)](#).

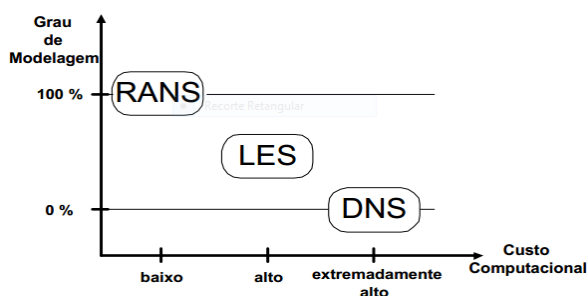


Figura 1.10: Contabilização VS compatibilização para modelação turbulenta.

Por ser um software de fonte aberta (*open source*) simplifica a compreensão do utilizador ao software e permite modificar algo em específico para certas fins.

A curva de aprendizagem no *OpenFOAM* está limitada aos tutoriais disponibilizados pelo mesmo e a alguns cursos pagos. Com os tutoriais é possível adaptar a sua base a quase todos os casos que queremos estudar.

Estão incluídos outras ferramentas de pré-processamento de geração de malhas, manipulação de composição de domínios computacionais para processamento paralelo e para pós-processamento o *paraView*. Apresenta capacidades numéricas de simulação RANS, LES e DNS, para escoamentos incompressíveis e compressíveis, e *solvers* numéricos de dinâmica molecular, combustão, entre outros.

Os casos do *OpenFOAM*, têm as várias pastas como podemos ver na fig. 1.11, que estão distribuídas do seguinte modo:

- Pasta 0, estão os ficheiros com as informações com as condições de fronteira para cada campo de pressão, velocidade, turbulência, ε (epsilon) para as condições fronteiras de todos os planos.
- Pasta **constant**, estão os ficheiros **RASProperties** que contém as constantes para o modelo de turbulência e **transportProperties** equações de transporte. Esta contém outra pasta **polyMesh** que é composto por os ficheiros com a geometria e domínio compu-

tacional, suas malhas e propriedades e condições de fronteira identificadas no domínio computacional.

- Pasta **system**, estão os critérios para os esquemas de convecção no ficheiro **fvSchemes** e critérios de convergência no ficheiro **fvSolution**. Contém também os ficheiros **controlDict** que controlam o tempo e os dados **input/output** da base de dados do A curva de aprendizagem no, o **decomposeParDict** contém informação para processamento em paralelo e **sampleDict** os critérios para extração de dados pós-processamento.
- Pasta **postProcessing**, é onde a ferramenta **sample** vai extrair os dados da simulação realizada.

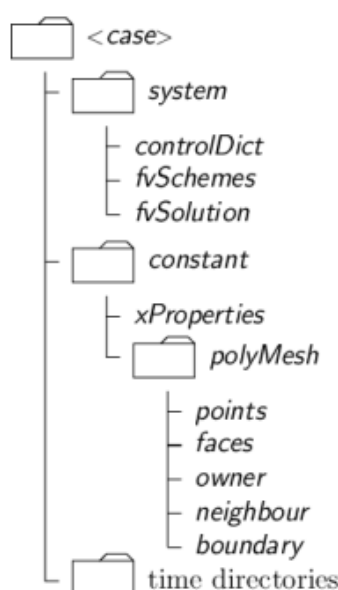


Figura 1.11: Estrutura dos ficheiros do OpenFOAM. De [OpenFOAM](#).

Para especificação das **patches** e condições de fronteira no *OpenFOAM*, seguimos o esquema da seguinte figura 1.12, que foi retirada do site do [OpenFOAM](#)

A simulação de escoamentos atmosféricos em OpenFOAM na indústria energética, não é uma prática muito usual, o seu uso é neste instante meramente acadêmico. Segundo [Tapia \(2009\)](#), [Martinez \(2011\)](#) e [da Silva Azevedo \(2013\)](#), que fizeram a sua tese sobre escoamentos atmosféricos em *OpenFOAM*, chegaram à conclusão que embora esta seja uma ferramenta muito promissora para estes escoamentos atmosféricos sobre topografias complexas. A criação de malhas a partir os dados topográficos é uma tarefa que apresenta algumas dificuldades, e faltam alguns modelos importantes no *OpenFOAM* para o fazer adequadamente, tal como considerar diversas rugosidade sobre topografia e compatibilização das força Coriolis.

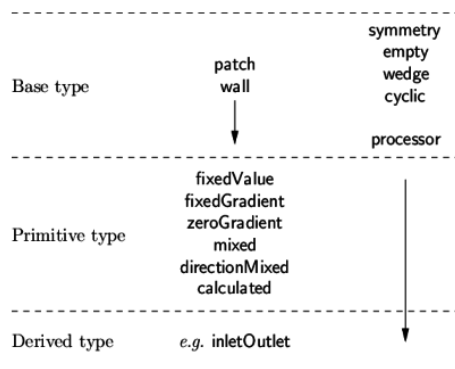


Figura 1.12: Atributos das *patches* do *OpenFOAM*. De [OpenFOAM](#).

1.6 Software Windie

O [Windie](#) é uma ferramenta desenvolvida por docentes e investigadores ligados ao *ISEP*, em parceria com a empresa *MEGAJOULE Inovação*. É um software com a finalidade de estudo para implementação de parques eólicos, com obtenção de informação mais precisa. Este usa também a Mecânica de Fluidos Computacional (*CFD - Computational Fluid Dynamics*), que modeliza escoamentos atmosféricos utilizando o método dos volumes finitos.

As características que distinguem o *Windie* do *OpenFOAM* são:

- Modelo de floresta avançado, que inclui uma descrição vertical das árvores e técnicas de interpolação para melhor modelação de áreas de floresta com formas complexas;
- acoplamento com modelos de mesoescala, o que permite o uso de condições de fronteira muito mais representativas do escoamento local
- inclusão de efeitos de Coriolis e impulsão

Capítulo 2

Modelos Físicos Utilizados

As equações que descrevem o movimento de um fluido incompressível são as equações de conservação de massa (equação 2.1) e da quantidade de movimento linear (equação 2.2). Em caso de ser um fluido Newtoniano a equação que constitui a tensão da viscosidade é dada por 2.3.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (2.2)$$

$$\sigma_{ij} = \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \nu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (2.3)$$

Combinadas as equações 2.1 e 2.3, obtém-se a seguinte fórmula de *Navier-Stokes*. 2.4.

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right). \quad (2.4)$$

2.1 Equações e Modelo RaNS

Neste trabalho, vamos usar o modelo $k - \varepsilon$ *Atmosférico*, que segundo [Launder and Sharma \(1974\)](#), aplicada a escoamentos incompressíveis e estacionários. Este modelo está incluído no código simpleFoam do [OpenFOAM](#). A fórmula para a viscosidade turbulenta, μ_t , para este modelo é a seguinte

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.5)$$

C_μ é uma constante adimensional que relaciona a tensão de corte turbulenta com a energia cinética turbulenta. k é a energia cinética turbulenta que é definida por,

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} \right). \quad (2.6)$$

$k - \varepsilon$	C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
Standard	0.090	1.00	1.30	1.44	1.92
Atmosférico	0.033	1.00	1.85	1.44	1.92

Tabela 2.1: Coeficientes para o modelo de $k - \varepsilon$.

O rácio de dissipação de ε , é obtido pelas duas equações,

$$\rho \frac{d\overline{u_j}k}{dx^j} = \frac{d}{dx^j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dx^j} \right] + P_k - \rho\varepsilon, \quad (2.7)$$

$$\rho \frac{d\overline{u_j}\varepsilon}{dx^j} = \frac{d}{dx^j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dx^j} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1}\varepsilon}{k} P_k - \frac{C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon^2}{k}. \quad (2.8)$$

P_k é o termo de produção de k ,

$$P_k = \sigma_{ij} \frac{d\overline{u_i}}{dx^j}, \quad (2.9)$$

e a tensão de Reynolds, σ_{ij} , é dada por

$$\sigma_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \sigma_{ij} \left(\frac{d\overline{\mu_i}}{dx^j} \frac{d\overline{\mu_j}}{dx^i} \right). \quad (2.10)$$

Quanto ao números de Prandtl, σ_k e σ_ε , interligam a difusividade de k e ε e viscosidade turbulenta e as constantes adimensionais $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ permitindo a correção proporcional entre os termos na equação 2.8.

Para um $k - \varepsilon$ *Standard*, podemos usar as constantes obtidas por [Launder and Sharma \(1974\)](#) e as propostas por [Beljaars et al. \(1987\)](#), que são muitas vezes associadas a escoamentos atmosféricos, apresentadas na tabela 2.1.

Capítulo 3

Ferramentas e Modelos Utilizados

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as ferramentas e metodologias utilizadas nesta simulação de escoamentos atmosféricos neutralmente estratificados. As simulações dizem respeito ao escoamento sobre uma topografia que pode ser considerada média a complexa. São realizadas em OpenFOAM, versão 2.3, e as ferramentas para criação de malhas e condições de fronteira serão as desenvolvidas por [da Silva Azevedo \(2013\)](#) que foram desenvolvidas em FORTRAN [gfortran](#). Estas ferramentas destinam-se a criar condições de fronteira em tudo (ou o mais possível) idênticas às que foram usadas nas simulações em *Windie* que produziram os resultados com que servirão de termo de comparação.

3.2 Sequência de Procedimentos Utilizados no *OpenFOAM*

Para a criação de um caso de estudo no *OpenFOAM* é recomendado começar por seguir um dos tutoriais. Começa-se por escolher a pasta que contém o *solver* que é pretendido para caso de estudo (informações sobre os solvers estão no site do [OpenFOAM](#)). Após a escolha do solver, o próximo passo é adaptar o nosso estudo ao formato do OpenFOAM. Passa-se a geometria em estudo para uma malha com os requisitos pretendidos, após o que devemos identificar as condições de fronteira. Os tipos de Condições de fronteira estão enumerados abaixo, e encontram-se no ficheiro da pasta `constant/polyMesh/blockMeshDict`. Após estar definida a malha, vamos gerá-la através da ferramenta `blockMesh`. Em seguida, deve-se ajustar no ficheiro `constant/RASProperties` e `/transportProperties` as propriedades do fluido em estudo. Na pasta 0 é necessário identificar as propriedades das condições de fronteira, seu tipo e é possível também introduzir algumas constantes/funções nos campos de U (velocidade), k , ε , entre outros. O passo seguinte será ir para a pasta `system` e completar os critérios para os esquemas de convecção no ficheiro `fvSchemes` e os critérios de convergência no ficheiro `fvSolution`. Também nos ficheiros `controlDict` encontra-se

a informação para processamento em paralelo e no `sampleDict` os critérios para extração de dados de pós-processamento. Informações sobre outras ferramentas podem também ser consultadas no site do [OpenFOAM](#).

Para a modelação de geometrias, temos 6 tipos de condições disponíveis para usar nas condições de fronteira:

- O `patch` é um patch genérico que não contém informação sobre a malha da geometria ou topografia. Exceto o `inlet` e `outlet`.
- `wall` é a designação para uma parede física. Esta irá ser usada para representar o solo da topografia.
- O `symmetryPlane` como o nome indica, é usado para representar planos de simetria.
- `empty` - O *OpenFOAM*, para simular escoamentos bidimensionais, utiliza malhas tridimensionais. Assim, nas faces correspondentes/paralelas ao plano bidimensional existe uma continuidade na direcção perpendicular que não precisa de ser resolvida. Nessas faces é aplicada esta condição - `empty`.
- O `wedge` serve para criar geometrias cilíndricas. Tal como na condição `empty`, destina-se a casos em que existe uma continuidade na direcção angular, rodando em torno de um eixo.
- `cyclic` permite que dois `patches` possam ser tratados como se estivessem fisicamente ligados. São muito utilizados para simulações de trocas de calor através de tubos.
- `processor` faz com que, se um código está a ser executado em paralelo por um certo número de processadores, a malha seja dividida de modo que cada processador calcule aproximadamente o mesmo número de células.

Os tipos primitivos estão listados na tabela 3.1.

3.3 Simplificações do Modelo Utilizado

Por uma questão de limitar a complexidade do trabalho e da análise dos resultados, foram consideradas algumas simplificações nas simulações que foram efetuadas, quer no *OpenFoam*, quer no *Windie*:

- **Ausência da força gravitacional e flutuabilidade**, num estado estratificado e num fluido idealmente estratificado, há uma ausência dos efeitos de flutuabilidade, pois não é compatibilizada a temperatura e outros fatores. A pressão hidrostática também não vai ser compatibilizada, devido à ausência de gravidade.
- **Ausência de um modelo de rugosidade**. O *OpenFOAM* está limitado aos efeitos aerodinâmicos de uma rugosidade uniforme z_0 , pelo que será esta a forma como será considerada a rugosidade em todas as simulações.

Tipo	Descrição das condições do campo Φ	Dados a especificar
fixedValue	Valor de Φ tem de ser especificado.	valor
fixedGradient	O gradiente normal de Φ tem de ser especificado.	gradiente
zeroGradient	O gradiente normal de Φ é 0.	-
calculated	A condição de fronteira Φ deriva de outros campos.	-
mixed	A condição de fixedValue e fixedGradient dependem do valor valueFraction.	refValue, refGradient, valueFraction e value.
directionMixed	Uma condição mista com tensorial valueFraction.	refValue, refGradient, valueFraction e valor.

Tabela 3.1: Campos dos `patches` das condições de fronteira.

- **Ausência de de modelação da força Coriolis.** As equações de transporte no OpenFOAM não têm a capacidade de compatibilizar estas forças. Para a aplicação da força Coriolis no *OpenFOAM*, podemos aceder ao trabalho de [Tapia \(2009\)](#).
- **A modelação de escoamento incompressível e ar seco**, que de acordo com o pesquisado no capítulo 3, é o mais correto para simulação de escoamentos atmosféricos neutralmente estratificados, e que vai ter pouco impacto nos resultados finais.

3.4 Geração de Malhas

Na fase de pré-processamento criamos as malhas de cálculo, condições de fronteira, campos iniciais de pressão, velocidade, turbulência e entre outros. Seleccionamos também os modelos numéricos a usar e as equações de transporte.

É necessário tomar em consideração a racionalização dos recursos computacionais a usar. Foi usada uma malha pouco refinada nos locais mais afastados ao ponto de interesse, enquanto em zonas próximas desse ponto central foi usada uma malha mais refinada de modo a obter dados mais realistas.

A geração de malhas é feita a partir de ficheiros de texto (formato `.dat`) com grande resolução, em que as coordenadas dos pontos da superfície da topografia estão organizados segundo linhas ortogonais, *xyz*. A geração da malha é feita a partir da superfície usando a ferramenta de pré-processamento do *Windie* chamada `gsurf`. Para expandir a malha tridimensional a partir dessa malha bidimensional, em formato `.vtk`, foi utilizada uma ferramenta desenvolvida por [da Silva Azevedo \(2013\)](#), designada por `write_blockMeshDict`. Esta ferramenta escreve o ficheiro `blockMeshDict`, que servirá de base à geração da malha para *OpenFOAM*, usando as suas ferramentas de pré-processamento. Para que a comparação que vai ser feita seja válida, todo este processo tem um ponto de partida comum às simulações efetuadas em *Windie*: o ficheiro `preproc.cfg`, que contém os requisitos que

Patch	Atributo	Valor
ground, inlet	zeroGradient	-
sky, front, back	symmetryPlane	-
outlet	fixedValue	uniforme 0
internalField	-	uniforme 0

Tabela 3.2: Condições de fronteira para o campo de pressão, p .

queremos usar para especificação da malha, orientação destas, etc.. Os seus parâmetros estão descritos em anexo na página 61.

Foi simulada uma topografia situada na Grécia, considerando u, domínio circundante com uma área de 10x10 [km] e 4.5 [km] de altura com 101 nós em x e em y e 30 em z , com um rácio de compressão de 194.76 junto ao solo. No entanto, para se poder simular todas as direções do vento, fez-se rodar a topografia de 30° em 30°, estudando-se assim 12 sectores de origem do vento. Partimos do norte (0°), rodando para leste (90°, tendo-se passado por 30° e 60°), e assim sucessivamente.

3.5 Condições de fronteira

Para o céu (**sky**), parte da frente (**front**) e trás (**back**) foi usado o atributo **symmetryPlane** (**zeroGradiente**), no solo (**ground**) foi usado um gradiente nulo com o atributo **wall**, para a entrada (**inlet**) um gradiente nulo e à saída (**outlet**) um valor fixo (**fixedValue**). Todas estas informações foram retiradas e baseadas no guia do **OpenFOAM**.

A tabela 3.2 mostra as condições de fronteira para o campo de pressão de cada *patch*, para introdução no *OpenFOAM*.

Nas condições de fronteira, para a obtenção do campo de U , k e ε foi usada a ferramenta criada por da Silva Azevedo (2013) designada por **write_bCs**. Ela escreve estes parâmetros num ficheiro compatível com o *OpenFOAM*. Para garantir gradiente nulo em k e ε , e conservação de massa para a U , define-se o atributo **inletOutlet** no *OpenFOAM*.

Para as condições de fronteira no **inlet**, U , k , ε , F. A. Castro and Lopes (2003) propôs as equações 3.1, 3.2 e 3.3.

•

$$U = \begin{cases} \frac{u_* \ln(1 + z/z_0)}{k}, & z < \delta \\ \frac{u_* \ln(1 + \delta/z_0)}{k}, & z \geq \delta \end{cases}, \quad (3.1)$$

•

$$K = \begin{cases} \frac{u_*^2(1 - z/\delta)}{\sqrt{C_\mu}}, & z \leq 0.99\delta \\ \frac{u_*^2}{100\sqrt{C_\mu}}, & z > 0.99\delta \end{cases}, \quad (3.2)$$

•

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{kz}, & z \leq 0.95\delta \\ \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{0.95\delta z}, & z > 0.95\delta \end{cases} . \quad (3.3)$$

Para as condições de fronteira do chão (**ground**), a velocidade, u , vai ser de zero, de modo a fazer um perfil de velocidade mais realista e evitar também a necessidade de integração do modelo de turbulência numa parede que aumenta o poder computacional necessário, segundo [Pope \(2000\)](#). Nas restantes equações:

- Para k foi usado o `kqRWallFunction`, retirado dos documentos do [OpenFOAM](#), que define um gradiente zero nas paredes que no nosso caso são o solo. Para escoamentos atmosféricos segundo [Pope \(2000\)](#), este afirma que o valor de k é uma constante ao longo do solo. De modo a obter essa constante foi usada a seguinte função retirada de [F. A. Castro and Lopes \(2003\)](#),

$$k_{wall} = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}. \quad (3.4)$$

- A função usada no *OpenFOAM* é a `epsilonWallFunction` que usa as equações de ε "santard", descrita por [Launder and Sharma \(1974\)](#) que resulta a equação 3.5. Esta função não compatibiliza a rugosidade presente no solo,

$$\varepsilon_{wall} = \frac{u_*^3}{\kappa z_p}. \quad (3.5)$$

Para a contabilização de rugosidade no solo para este caso, pode ser usada a fórmula 3.6 encontrada em [F. A. Castro and Lopes \(2003\)](#), sendo esta a utilizada na ferramenta da tese do [da Silva Azevedo \(2013\)](#),

$$\varepsilon_{wall-rug} = \frac{u_*^3}{\kappa(z_p + z_0)}. \quad (3.6)$$

Para o campo de velocidade (U), vão ser usadas as seguintes parâmetros para as condições de fronteira na tabela 3.3

Para os parâmetros k e ε usados nas as condições de fronteira estão descritos na tabela 3.4.

Para a geração dos ficheiros em *OpenFOAM*, com os parâmetros acima definidos, U , k e ε , foi usada a ferramenta `write_bCs` de [da Silva Azevedo \(2013\)](#).

Patch	Atributo	Valor	Palpite
ground	fixedValue	uniform (0 0 0)	-
sky, front, back	symmetryPlane	-	-
outlet	inletOutlet	internalField	-
inlet	fixedValue	Eq. 3.1	-
internal	-	-	uniform (0 0 0)

Tabela 3.3: Condições de fronteira para o campo de velocidade, u .

Patch	Atributo	Valor	Palpite
ground	respetiva função wall	-	Eq. 3.4 3.5
sky, front, back	symmetryPlane	-	-
outlet	zeroGradient	-	-
inlet	fixedValue	Eq. 3.2, 3.2	-
internal	-	-	Eq. 3.4, 3.5

Tabela 3.4: Condições de fronteira para o campo de k e ε .

3.6 Propriedades de Turbulência

No *OpenFOAM*, para configurar o modelo de RaNS, temos de configurar o ficheiro **RASProperties**, de modo a definir o modelo de turbulência e seus coeficientes, que passamos a enumerar. Como mencionado no capítulo 2, é usado o modelo de $k - \varepsilon$ Standard, onde C_μ é ajustado de acordo com as condições de escoamento. A energia cinética turbulenta k é por definição, de acordo com a Eq. 2.6, resultado da média das flutuações da velocidade, \bar{u}' , \bar{v}' , \bar{w}' . A velocidade u_* caracteriza o perfil de velocidade logarítmico da camada limite. C_μ é calculado pela equação 3.4, e σ_ε , ajustado segundo a fórmula de Beljaars et al. (1987),

$$\sigma_\varepsilon = \frac{k^2}{\sqrt{C_\mu}(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})}. \quad (3.7)$$

Para a obtenção do ficheiro, **RASProperties**, em formato do OpenFOAM foi usado a ferramenta **write_turbulenceProperties**, criada por da Silva Azevedo (2013), de modo a descrever o modelo de $k - \varepsilon$ Standard.

3.7 Pós-Processamento

A ferramenta usada para pós-processamento, com que foram retirados os dados das simulações realizadas no *OpenFOAM*, foi desenvolvida por da Silva Azevedo (2013) chamada de **write_sample**. O seu setup encontra-se no ficheiro **sampleDict**, no qual é baseada na ferramenta **sample** do *OpenFOAM*, permitindo tirar dados a uma altura constante acima

do solo de toda a topografia, ou tirar um plano ao longo da topografia com igualmente uma distância constante do solo, e/ou uma linha na vertical desde o solo (**ground**) até ao plano do topo (**sky**). Os ficheiros gerados pela ferramenta são de extensão **.vtk**, pelo qual podem ser visualizados no software *Paraview*.

Capítulo 4

Simulação e Tratamento estatístico

Este capítulo refere a como se procedeu à realização da simulação sobre a topografia média/complexa e consecutivos passos, tal como o seu pré-processamento e pós-processamento.

4.1 Procedimentos

Para a realização da simulação de escoamento atmosférico sobre a topografia complexa no *OpenFOAM*, seguimos os consecutivos passos, pré-processamento, simulação e pós-processamento. São realizadas várias simulações, de 30° a 30° , de modo a abranger uma rotação total da malha de 360 graus para poder prever o comportamento do escoamento do ar sobre todas as direções. Depois analisar através dos valores medidos nos anemómetros em formato de rosa dos ventos, as direções com maior velocidade média e mais número de ocorrências, para perceber quais as direções importantes e com grande contribuição energética. Fazer um estudo estatístico com a finalidade de comparar os resultados de *speed-up* e Intensidade turbulenta, com as simulações obtidas pelo software *Windie* e valores obtidos pelos anemómetros.

É de ter em atenção que a ferramenta desenvolvida por [da Silva Azevedo \(2013\)](#) na sua tese, foi feita para uma versão do *OpenFOAM* mais antiga, entretanto com a versão mais atualizada esta apresentava alguns bugs, que foram corrigidos de modo a ser compatível. Com o desenvolvimento do estudo foi verificado alguns bugs, que foram corrigidos.

4.2 Descrição das topografias

O caso de estudo é o de uma topografia de um local na Grécia. A elevação em estudo é uma serra, com uma altitude de aproximadamente 1600 m, cuja crista se orienta na direção Este-Oeste, ao longo de 400 m. Como é usual, optou-se por estudar um domínio exageradamente grande, refinando-se a malha na zona de maior interesse para o estudo: o topo de uma serra, onde foi instalado um parque eólico. Foram instalados, já a algum tempo atrás, previamente à instalação do parque, três mastros de medição de velocidade do ar, adiante designados por 305, 3011, e 30R, com anemómetros de copos colocados a

Malha	$N_x \times N_y \times N_z$	Σ	R_x e R_y	R_z	Az (m)
Grécia	1766 x 1766 x 30	3562	50 x 50	194,76	1

Tabela 4.1: Dimensões da malha da topografia na Grécia.

diferentes alturas do solo: 10 m e 31 m. O mastro 305 encontra-se localizado a Oeste, o 3011 é o mastro central e o 30R é o mastro situado a Este, atendendo à orientação da montanha. Os valores medidos e posteriormente tratados serão usados para comparações dos resultados das simulações.

4.3 Pré-Processamento

4.3.1 Geração das Malhas

Quanto à geração das malhas, estas tiveram de ser manipuladas pela ferramenta `gsurf` da pasta `_preproc/` gerando domínios com $10000 \times 10000 \text{ m}^2$ e 4500 m de altura, com rácio de expansão, $R = 50$, em x e y a partir do centro da topografia até á fronteira, e $R = 194,76$ em altura. Resultando na tabela 4.1. O ficheiro `preproc.cfg` com as especificações dos valores utilizados encontra-se impresso no anexo 63.

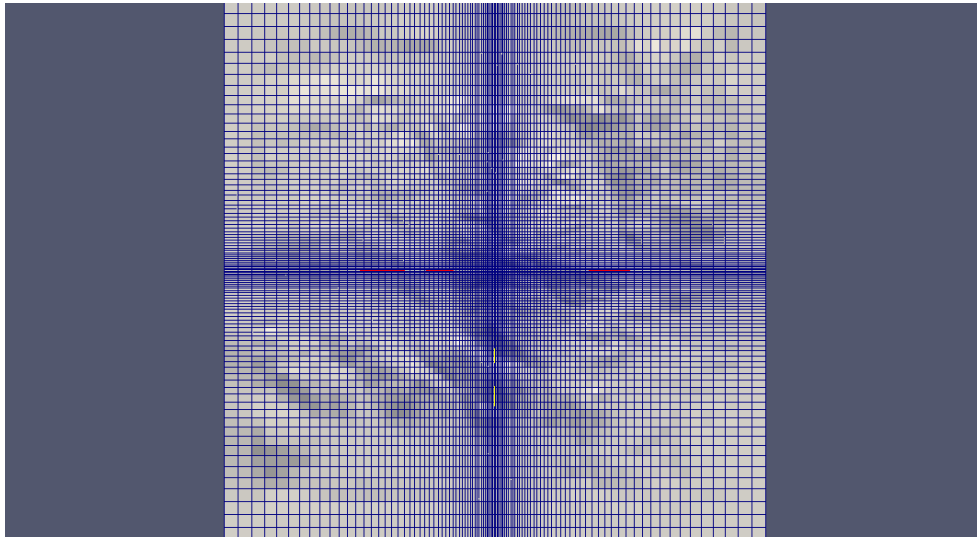


Figura 4.1: Resultado da malha da topografia com refinamento maior no centro.

Depois de correr a ferramenta `gsurf`, que "desenha" a malha no solo da topografia, resultando a figura 4.1, recorreu-se à ferramenta `write_blockMeshDict` para gerar a malha no eixo dos zz com os dados da tabela 4.1, e então correr a ferramenta `BlockMesh` do *OpenFOAM* para criar a malha final para a simulação. Esta cria os blocos no sentido positivo do eixo zz , ou seja na vertical, com as constantes antes escolhidas. Resulta daqui

a malha da figura 4.2 e 4.3. Depois utilizou-se a ferramenta `checkMesh` para verificar se continha algum erro com o resultado final, verificando-se a sua conformidade.

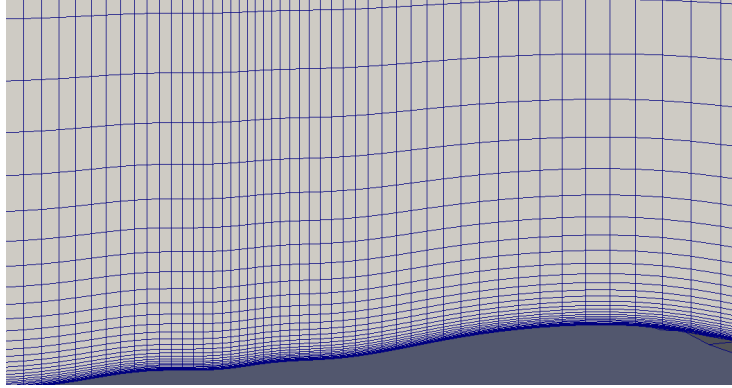
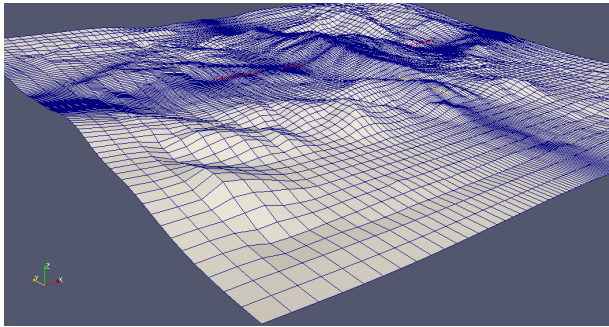
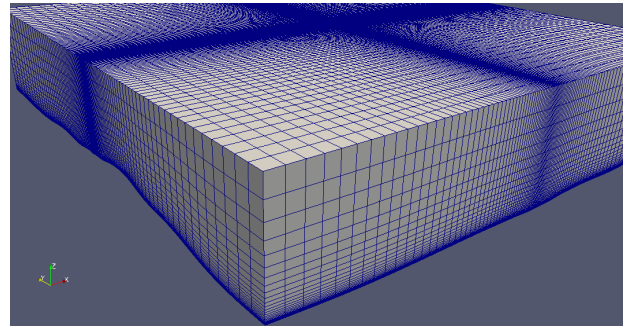


Figura 4.2: Refinamento, pormenorizado, da malha com rácio vertical de $R=194,76$ a partir do solo.



(a) Malha horizontal da topografia



(b) Malha vertical da topografia

Figura 4.3: Vista sobre a malha final

4.3.2 Condições de Fronteira e Modelo de Turbulência

Para os dados das condições de fronteira (`inlet`), a velocidade de referência do ar é de 0.40 m.s^{-1} com o devido perfil de velocidade, resultando como na figura 4.4, com os seus valores ao longo da altura da topografia, de modo a poder fazer o perfil de velocidade e comparar o "*Speed-up*" adimensional e intensidade turbulenta no *OpenFOAM* com o *Windie* e valores registados pelos anemómetros.

Estes valores são calculados pela ferramenta `write_bCs` que escreve as condições de fronteira nos ficheiros, `z.dat`, `z0.dat`, `u.dat`, `omega.dat`, `k.dat` e `epsilon.dat` na pasta `0/dat/`, os ficheiros `z`, `z0`, `u`, `omega`, `k` e ϵ na pasta `0/` e também o ficheiro `constant/RASProperties` que se encontram na raiz da pasta do nosso estudo.

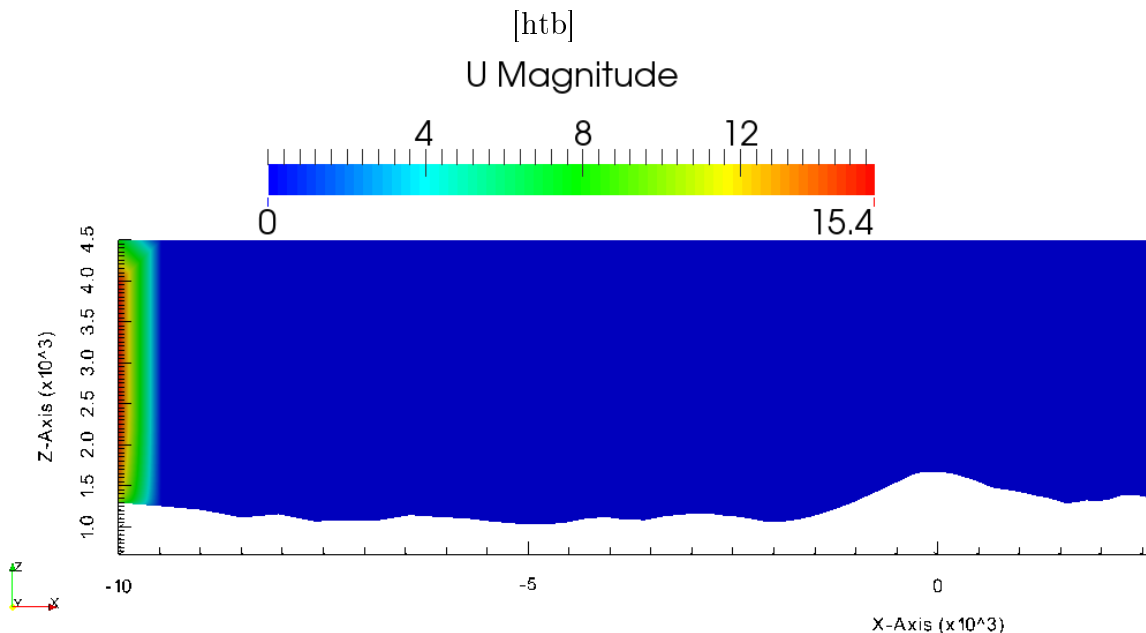


Figura 4.4: Perfil de velocidade à entrada (*inlet*) do domínio computacional.

$k - \varepsilon$	C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
Atmosférico	0.033	1.00	1.85	1.44	1.92

Tabela 4.2: Coeficientes para o modelo Atmosférico de $k - \varepsilon$.

A ferramenta criada por [da Silva Azevedo \(2013\)](#), na sua tese, permite selecionar vários modelos de turbulência já incorporados no *OpenFOAM*. Neste caso foi usado o modelo $k - \varepsilon$ para escoamento atmosférico, semelhante aos utilizado nas simulações do *Windie*, como já referidos antes. Na tabela 4.2 podemos ver os valores dos coeficientes do modelo a utilizados. Eles são introduzidos no ficheiro `constant/RASProperties`. As condições de entrada e iniciais encontram-se representadas na figura 4.5.

Pudemos por fim correr a ferramenta `write_turbulenceProperties`, que escreveu o ficheiro do anexo A.5.

4.4 Preparação Ambiente em *OpenFOAM*

Depois de as malhas, as condições de fronteira e os modelos de turbulência estarem definidas, são definidos os ficheiros da pasta `system`: `controlDict`, `fvSchemes`, `fvSolution` e `sampleDict`. As suas definições encontram-se no anexo A.4.

A partir daqui estão reunidas as condições para ser "corrida" a simulação com a aplicação `simpleFOAM`. Mas não sem antes se definir alguns parâmetros da aplicação.

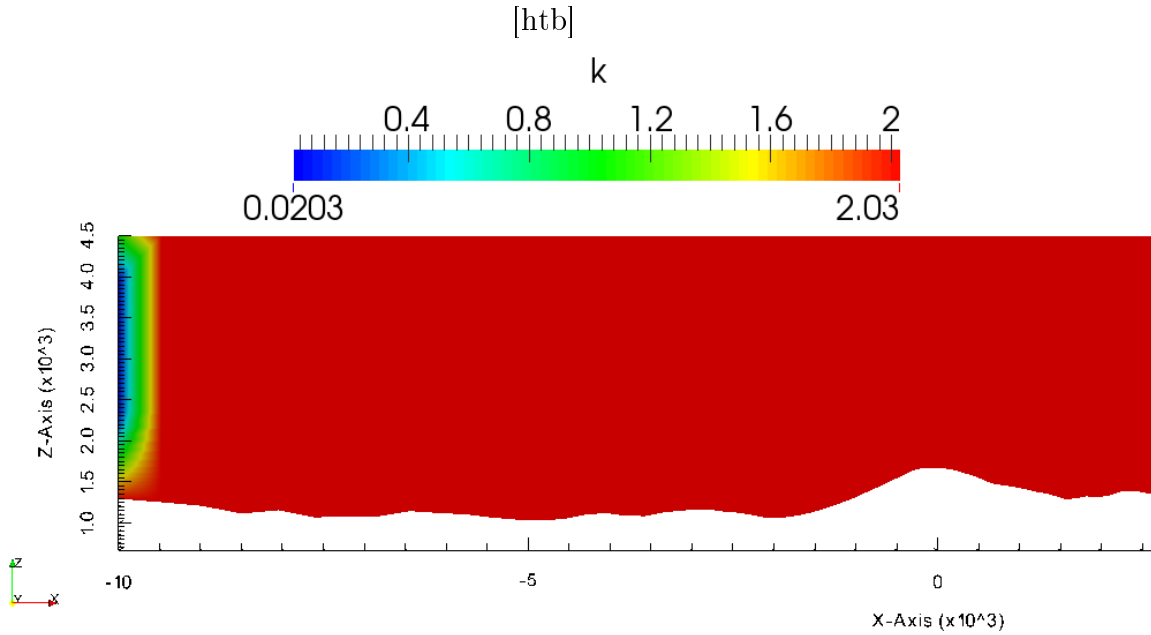


Figura 4.5: Perfil de turbulência (k) à entrada, inlet, do domínio computacional.

4.4.1 fvSchemes

Neste caso no *OpenFOAM*, vamos usar os seguintes esquemas de convecção: *QUICK* (*Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics*) e *Upwind*. O esquema convectivo a ser utilizado vai variar em função das variáveis k , ε e U . Segundo os testes realizados na tese de [da Silva Azevedo \(2013\)](#), para escoamentos $k - \varepsilon$ atmosféricos, o *QUICKV* demonstrou melhores resultados que o *QUICK*, sendo por isso no esquema que foi adotado para o campo de velocidades. Estas indicações são incorporadas no ficheiro `fvSchemes` (ver anexo [A.4](#)).

4.4.2 fvSolution

O módulo `simpleFoam` simula escoamentos em regime estacionário e incompressíveis, segundo o manual [OpenFOAM](#). Os critérios de convergência usados no processamento, são definidos no ficheiro `fvSolution`, que pode ser consultado na tabela [A.4](#). Esses valores são "standard" do *OpenFOAM*. Para o campo de pressão usou-se o *GAMG* (*Generalised Geometric-Algebraic Multi-Grid*) e o restante o *PBiCG* (*Preconditioned Bi-Conjugate Gradient*).

4.5 Pós Processamento

Na pasta `_postproc/`, temos uma ferramenta com o nome de `write_sample` criada por da Silva Azevedo (2013), que permite retirar as coordenadas ao longo da topografia a uma altura constante do solo e retirar as coordenadas em certos locais de interesse (tal como a posição dos anemómetros) de modo a retirar com a ferramenta do *OpenFOAM* `sample-latestTime` o perfil de velocidade e o resto dos dados para comparações. Entretanto o ficheiro `sampleDict` tem de ler as coordenadas `.vtk`, sendo preciso escolher os ficheiros de coordenadas `.vtk` a ser lidos, indicados no ficheiro do anexo A.4, `sampleDict`. Tendo em conta que a ferramenta de da Silva Azevedo (2013) não estava a conseguir fazer a rotação das posições dos mastros na malha, foi feito um código em R, página B.1, que nos dá em "coordenadas *OpenFOAM*" a posição desses mesmos. O resultado é apresentado nas figuras 4.6, sendo a posição original no software *Google Earth* apresentada na figura 4.7.

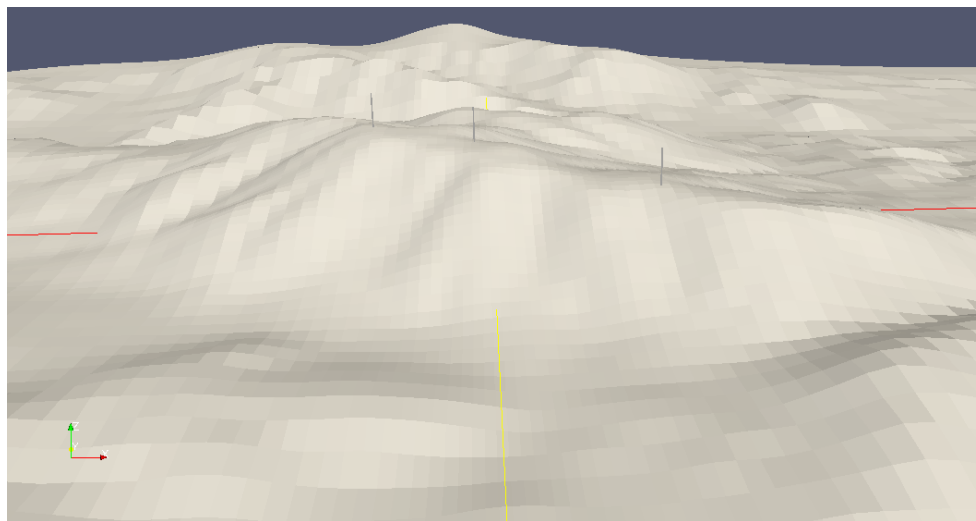


Figura 4.6: Posição dos mastros com uma rotação de 60° no sentido horário e vista de Norte.

Nesta ferramenta de pós-processamento foi encontrado um bug pelo qual as coordenadas dos mastros não estavam corretas. Estes apresentavam coordenadas de valores para baixo da superfície da topografia, em vez de valores até uma altura específica acima da desta, de modo a poder fazer a extração dos dados finais da simulação dentro do domínio. Outro bug que foi encontrado nesta fase tinha a ver com o facto de as coordenadas dos anemómetros não acompanharem a rotação da malha para outras direções senão a direção 0° . Este problema foi resolvido com a criação do código em anexo B.1, utilizado no R.

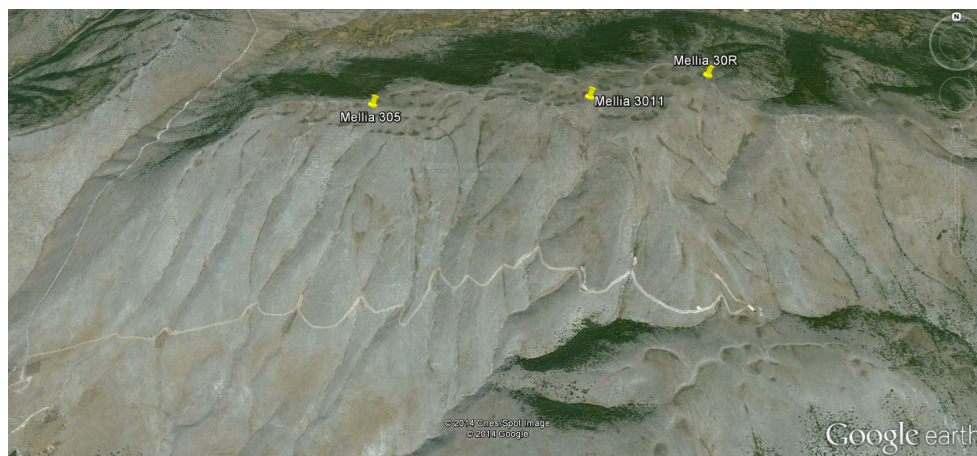


Figura 4.7: Posição dos mastros vista no *Google Earth*.

4.6 Análise e Discussão de Dados das Medições

4.6.1 Estudo dos Dados dos Anemômetros

Foi feita uma análise estatística em [R](#) com os valores medidos de velocidade média do vento (períodos de amostragem de 10 minutos) e o número de ocorrências. Isto para cada sector de direção de origem do vento. Também foram obtidos os valores de Intensidade Turbulenta a partir do desvio padrão da amostragem de 10 minutos. O objetivo era usar estes resultados como referência para a comparação que se iria efetuar entre os resultados do *Windie* e os do *OpenFOAM*, para todas as direções de 30° a 30° . Com os valores, tratados e limpos de contratempos de leitura dos anemômetros (por exemplo, congelamentos e outras anomalias), obtiveram-se as direções que de maior incidência do vento. Foi feita a análise para cada mastro, para as duas alturas onde foram feitas as medições: 10 m e 31 m. As figuras [4.8](#) a [4.16](#) apresentam o resultado deste tratamento estatístico dos dados medidos: as "rosas dos ventos" e as frequências de velocidades para cada anemómetro nos diversos mastros (designados por 305, 3011, e 30R).

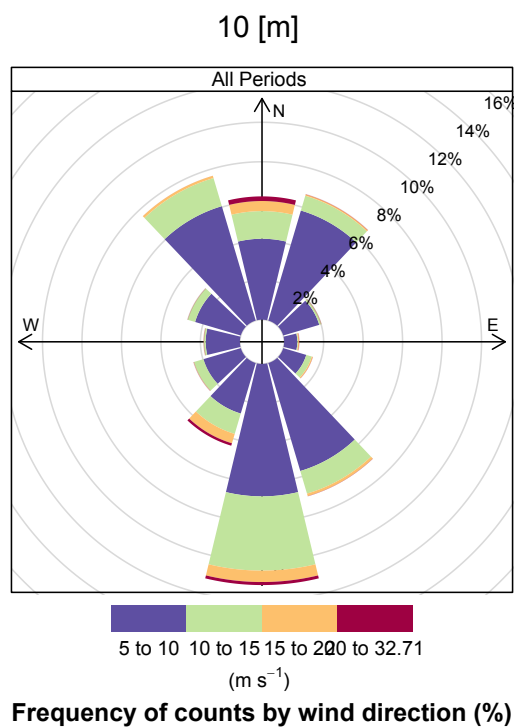


Figura 4.8: Direções e incidência do vento a 10 m de altura - Mastro 305.

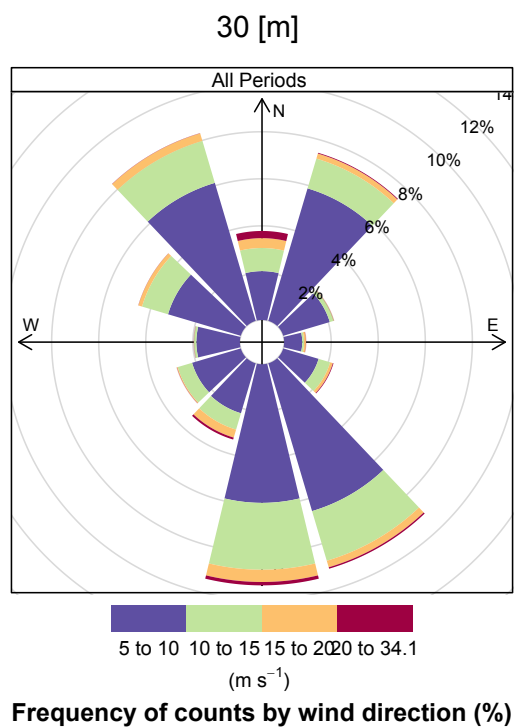


Figura 4.9: Direções e incidência do vento a 30 m de altura - Mastro 305.

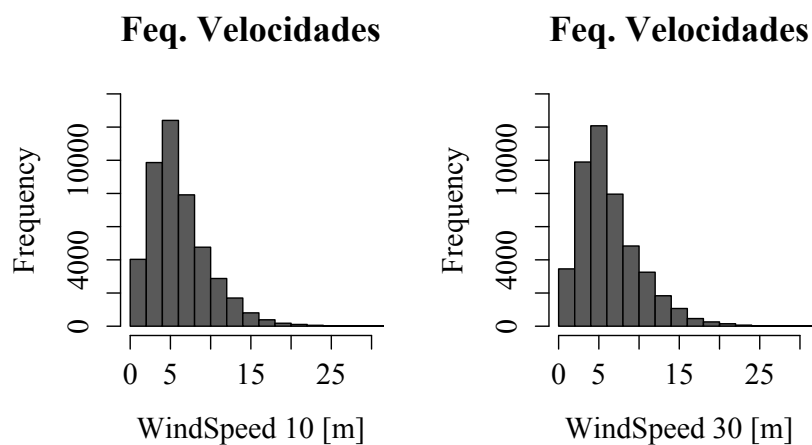


Figura 4.10: Comparação da frequência das velocidades para todas as direções a 10 m e 30 m do solo - Mastro 305.

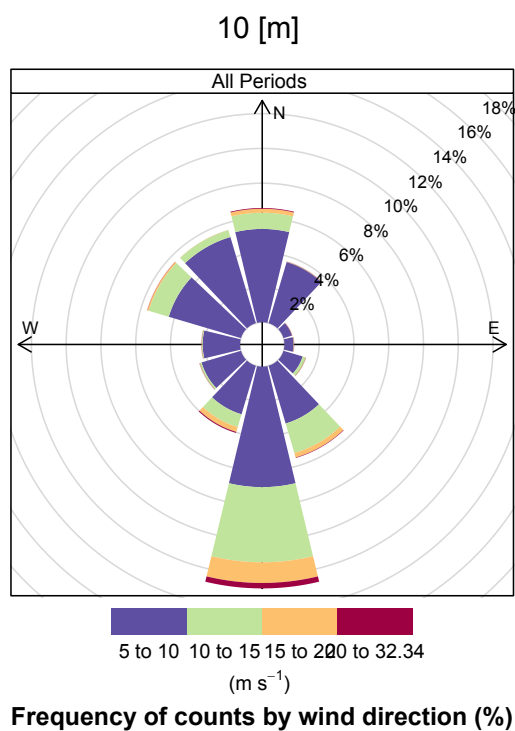


Figura 4.11: Direções e incidência do vento a 10 m de altura - Mastro 3011.

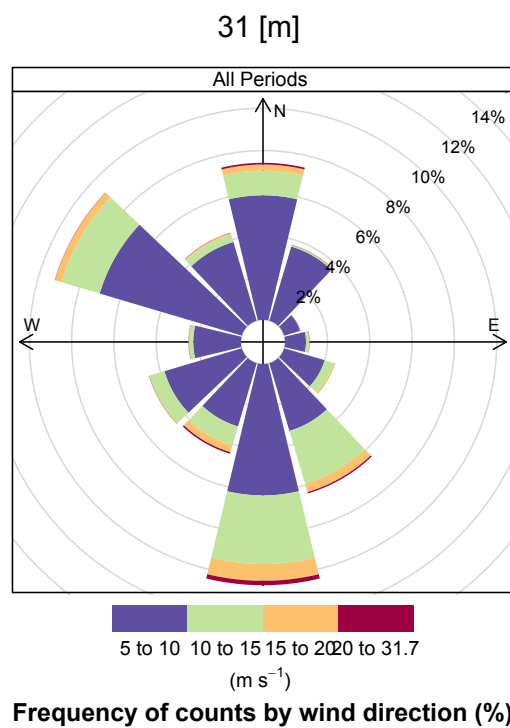


Figura 4.12: Direções e incidência do vento a 31 m de altura - Mastro 3011.

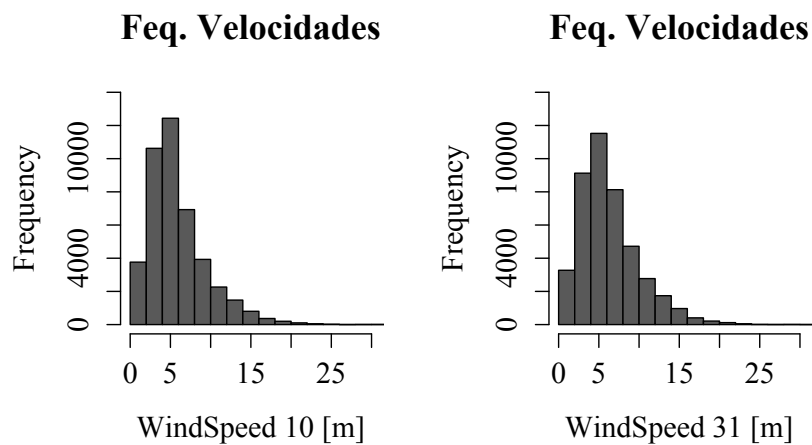


Figura 4.13: Comparação da frequência das velocidades para todas as direções a 10 m e 31 m do solo - Mastro 3011.

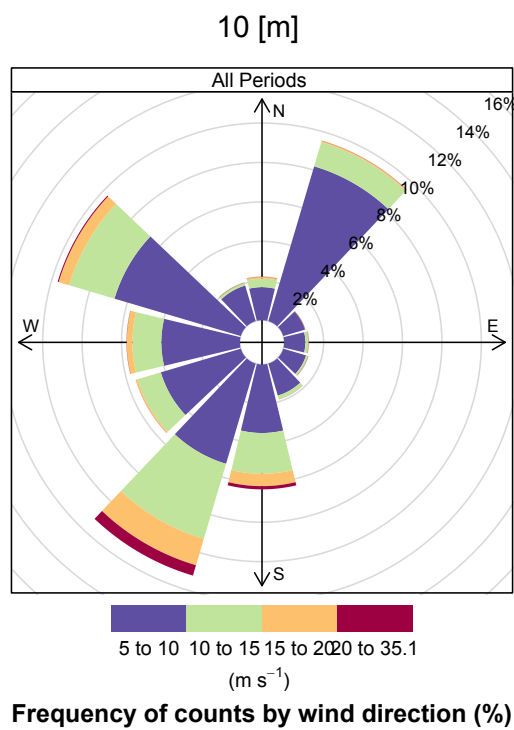


Figura 4.14: Direções e incidência do vento a 10 m de altura - Mastro 30R.

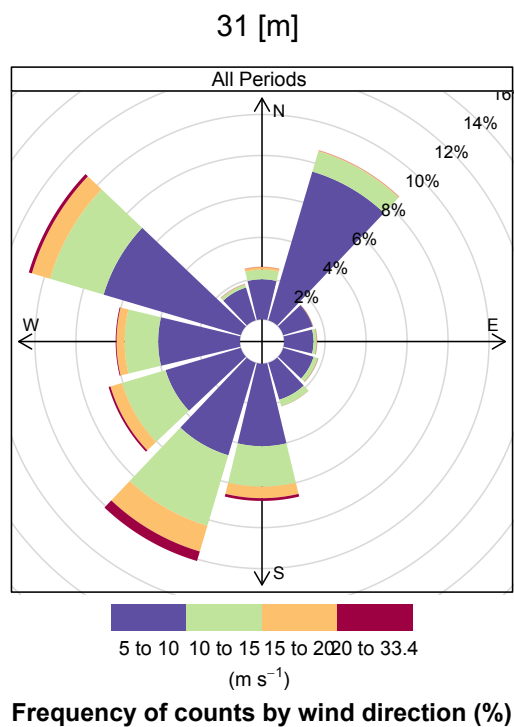


Figura 4.15: Direções e incidência do vento a 31 m de altura - Mastro 30R.

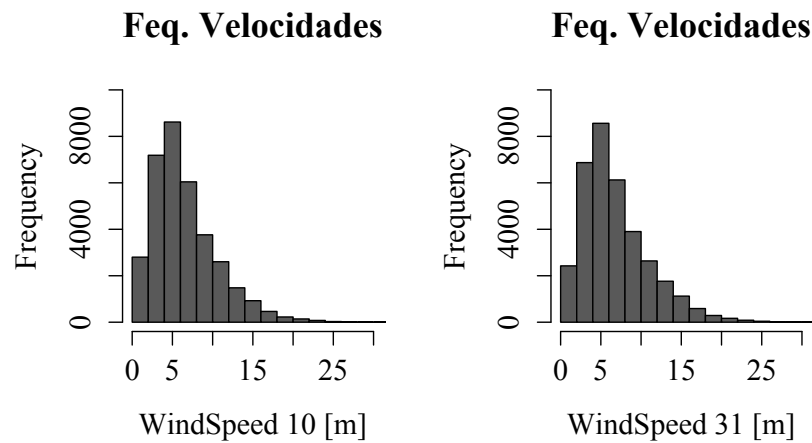


Figura 4.16: Comparação da frequência das velocidades para todas as direções a 10 m e 31 m do solo - Mastro 30R.

4.6.2 Comparação do Campo de Velocidade

A figura 4.17 representa o campo de velocidade simulado no *OpenFOAM* e a 4.18 o campo de velocidade simulado no *Windie*. Verificou-se no geral velocidades um pouco superiores no *Windie*. No entanto, este facto não será importante na análise de dados, pois

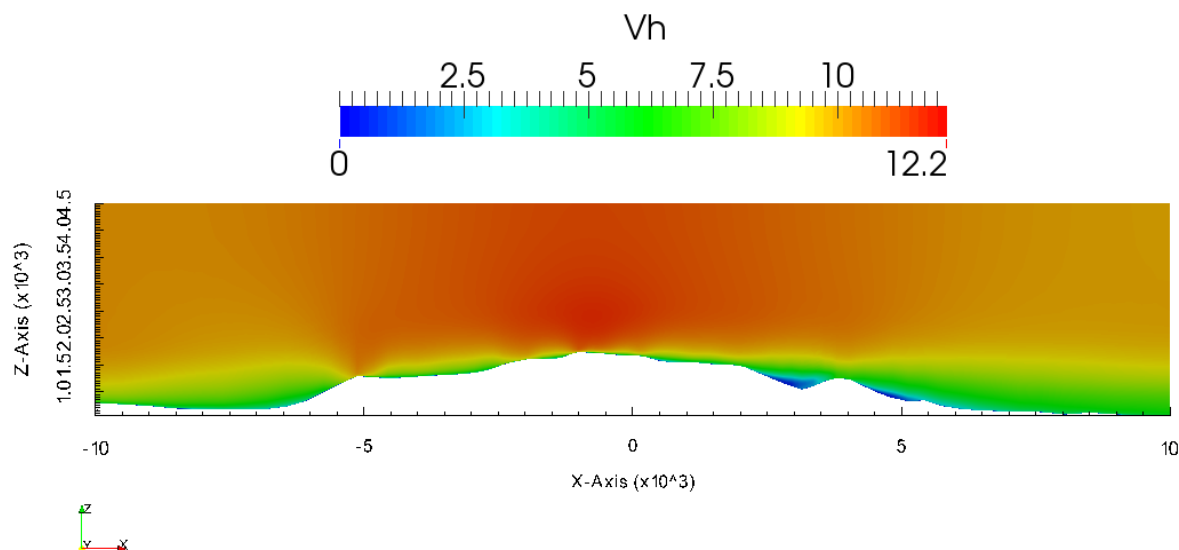


Figura 4.17: Campo da velocidade horizontal ao longo da topografia. Corte na direção Este-Oeste, visto de Norte para sul (vento de 90°), dos resultados da simulação no *OpenFOAM*.

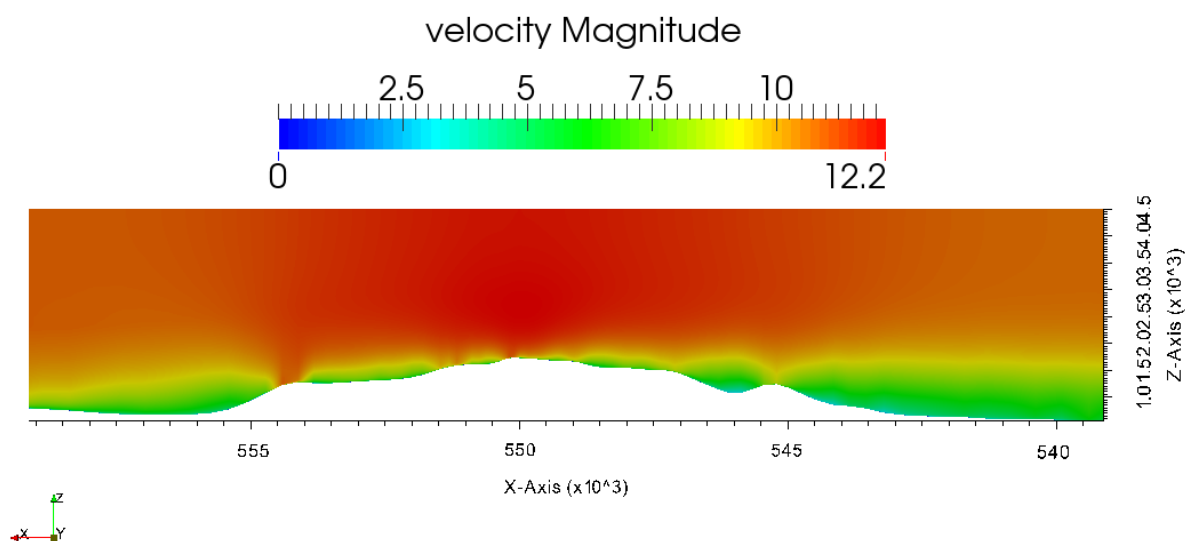


Figura 4.18: Campo da velocidade horizontal ao longo da topografia. Corte na direção Este-Oeste, visto de Norte para sul (vento de 90°), dos resultados da simulação no *Windie*.

4.6.3 Comparação dos Perfis de Velocidade nos Mastros

Na análise dos dados estatísticos, para medições de velocidade média horizontal (V_h), foram ignorados valores inferiores a 3 m.s^{-1} . Esta é a velocidade a partir da qual a turbinas começam a produzir energia. No pós-processamento do *Windie*, a velocidade horizontal é um dado fornecido automaticamente, enquanto no *OpenFOAM* os ficheiros vêm com velocidade em v_x, v_y e v_z ; para se obter a velocidade horizontal procede-se ao cálculo 4.1.

$$V_h = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (4.1)$$

Em seguida são apresentados nas figuras 4.19 a 4.30 os resultados dos perfis de velocidade horizontal obtidos nas localizações dos mastros. Estes perfis foram adimensionalizados pelo valor da velocidade horizontal na posição do anemómetro a 10 m do solo. Designamos esta grandeza por *Speed-Up*. Os resultados dos valores medidos são indicados com pequenos círculos, sendo os resultados do *Windie* e *OpenFOAM* apresentados por linhas contínuas, mais espessas e mais finas respetivamente. Relembramos que o mastro 305 encontra-se localizado a Oeste, o 3011 é o mastro central e o 30R é o mastro situado a Este.

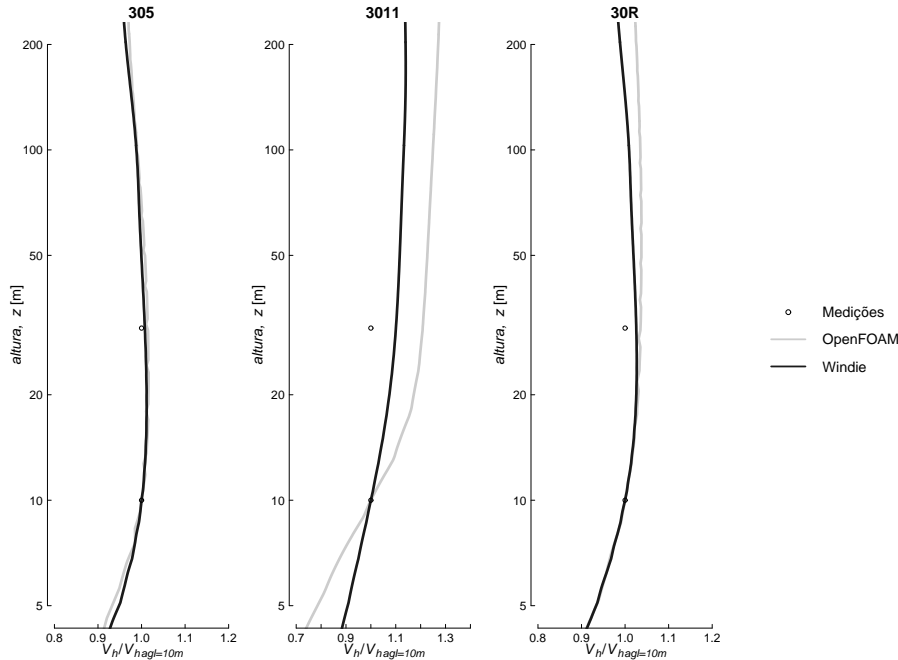


Figura 4.19: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 0° .

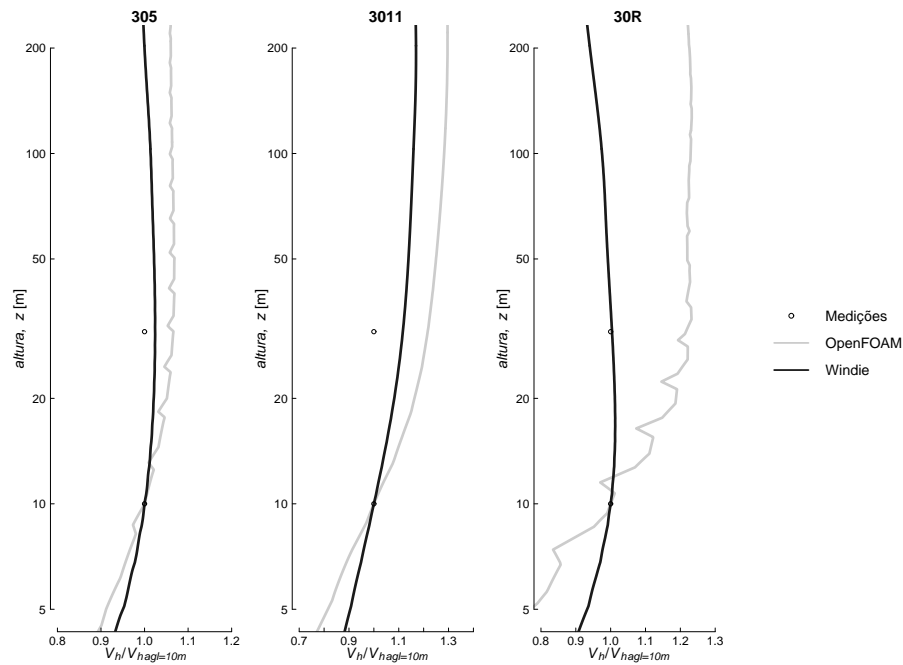


Figura 4.20: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 30°.

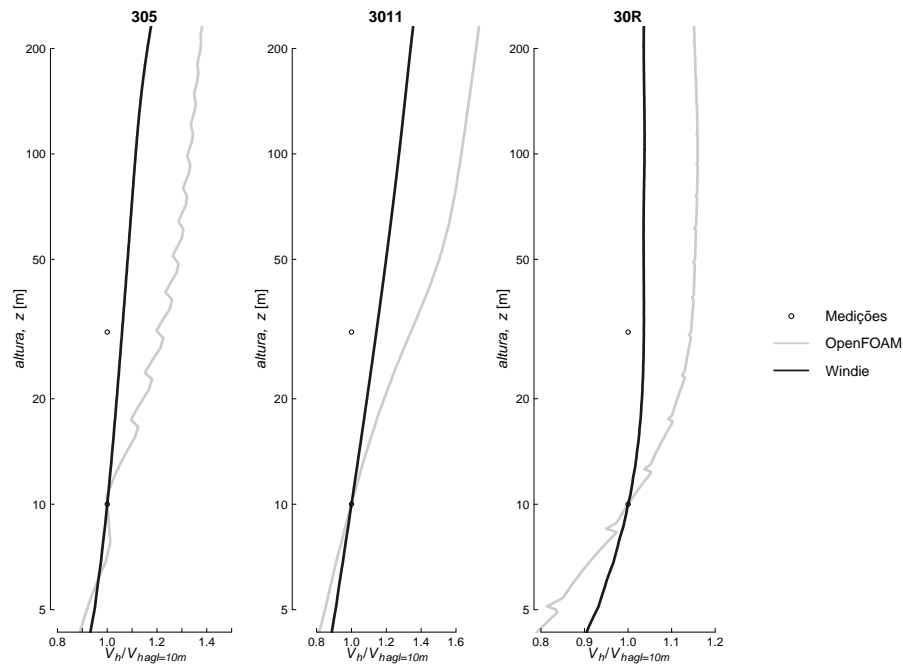


Figura 4.21: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 60°.

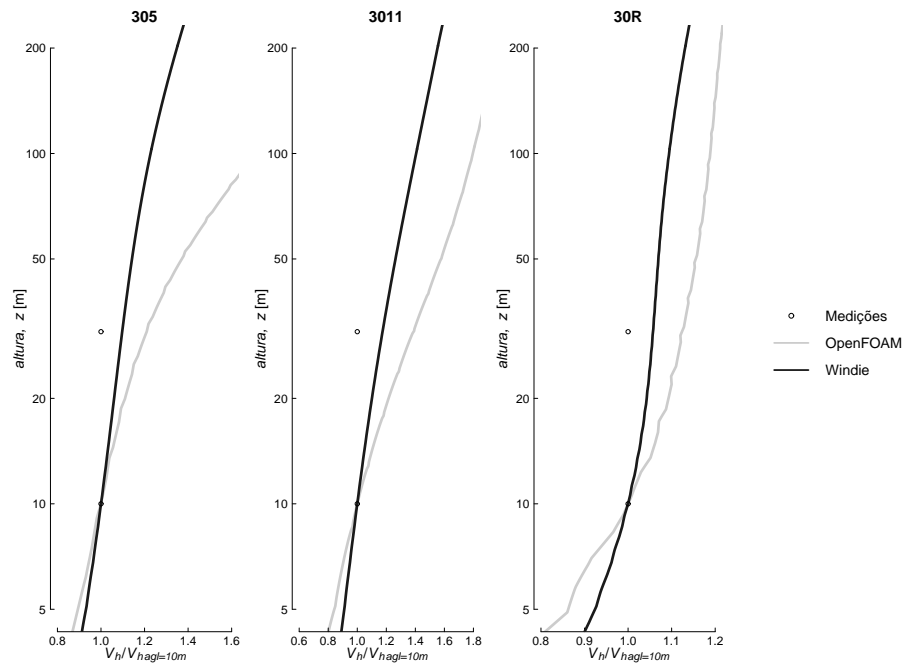


Figura 4.22: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 90°.

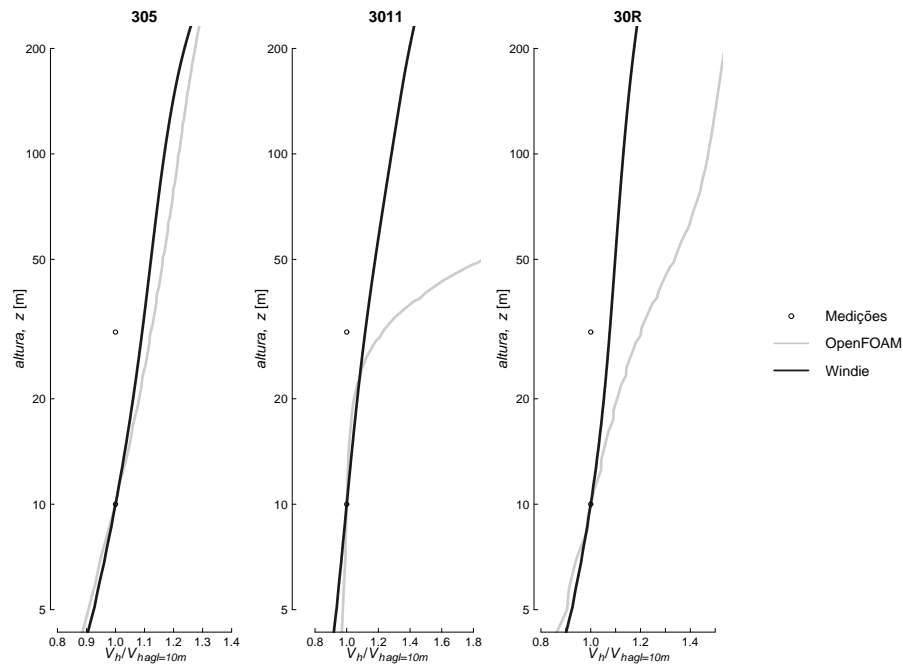


Figura 4.23: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 120°.

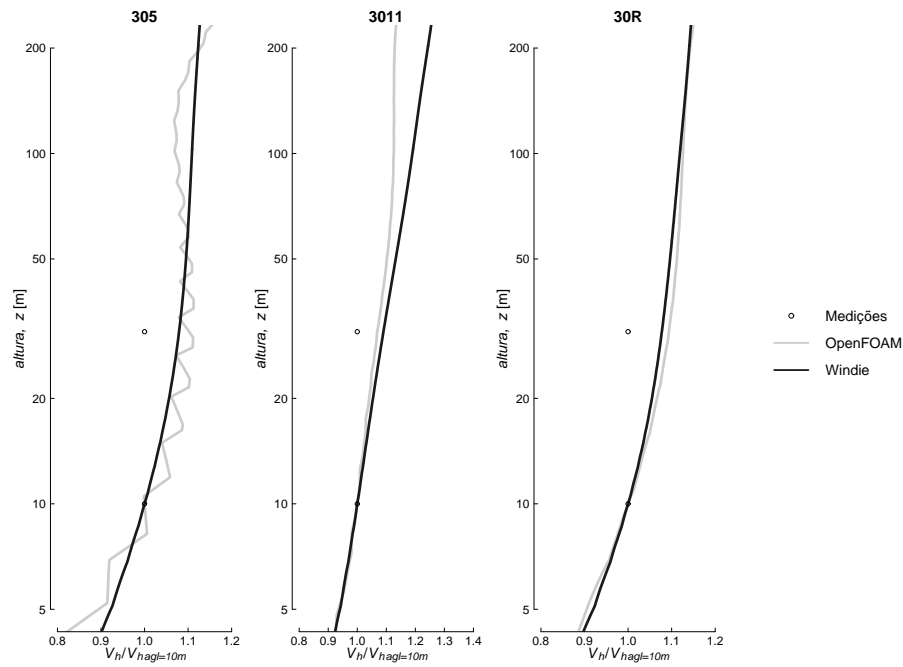


Figura 4.24: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 150°.

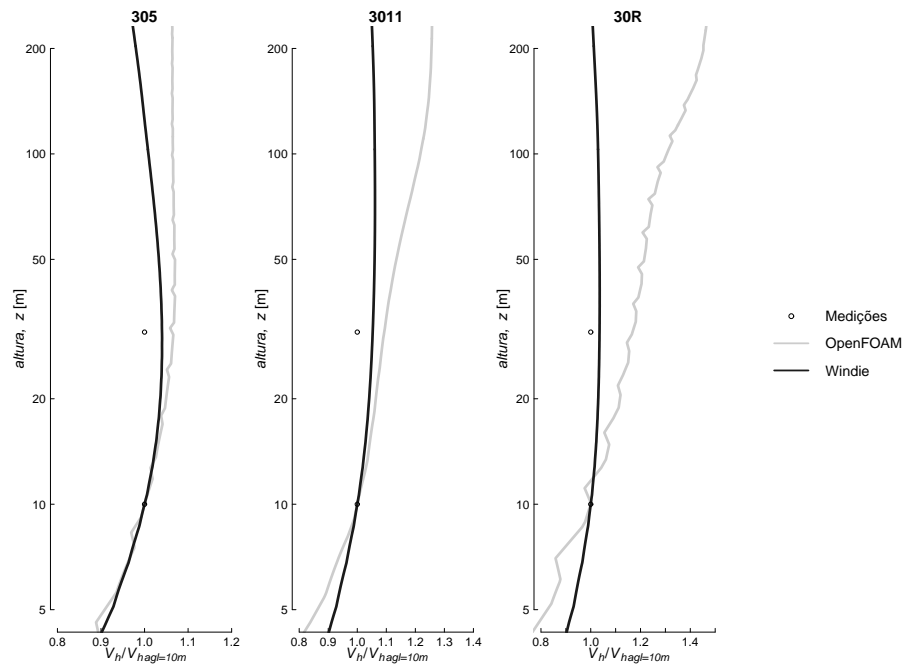


Figura 4.25: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 180°.

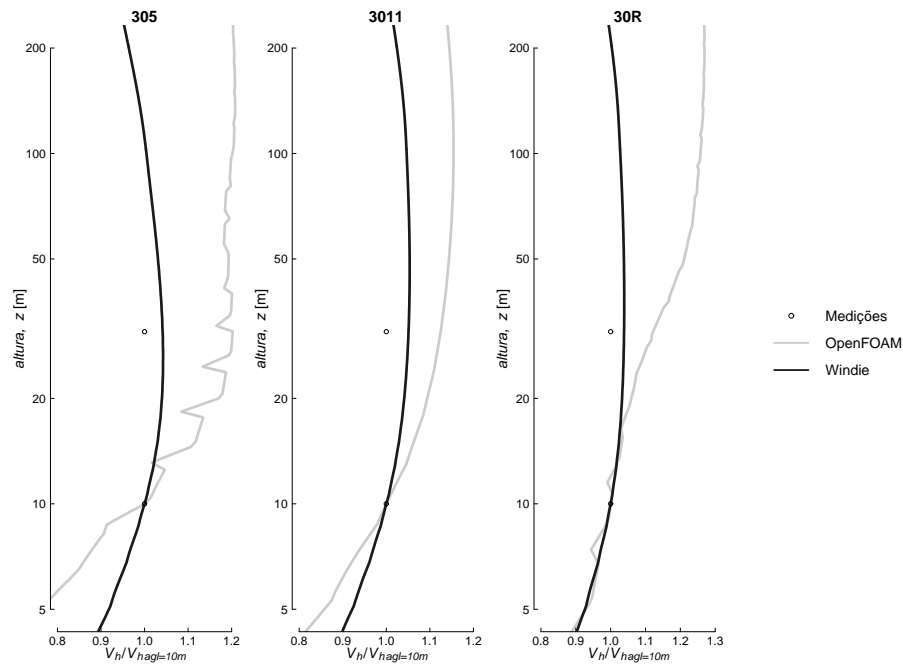


Figura 4.26: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 210°.

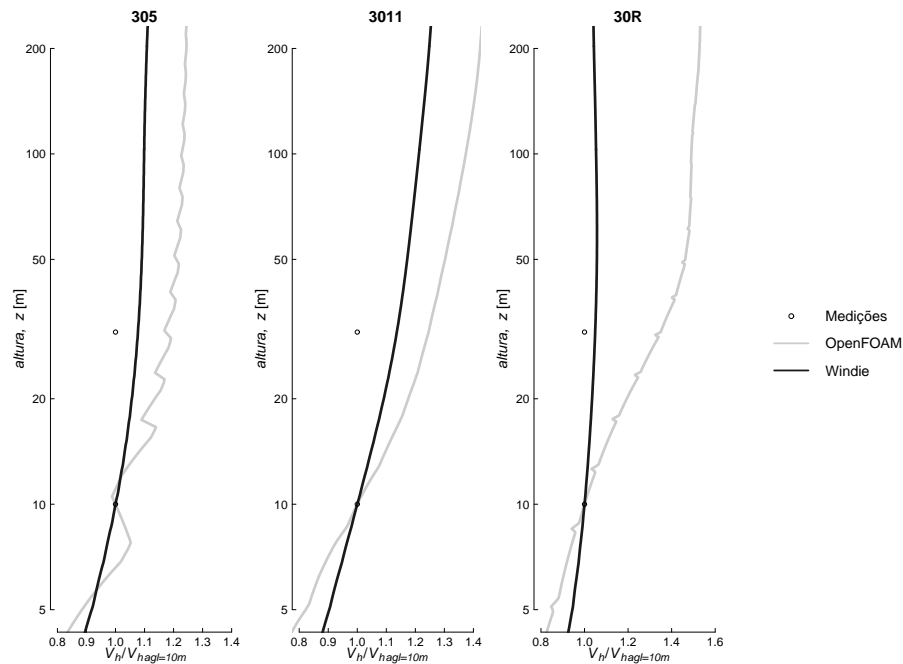


Figura 4.27: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 240°.

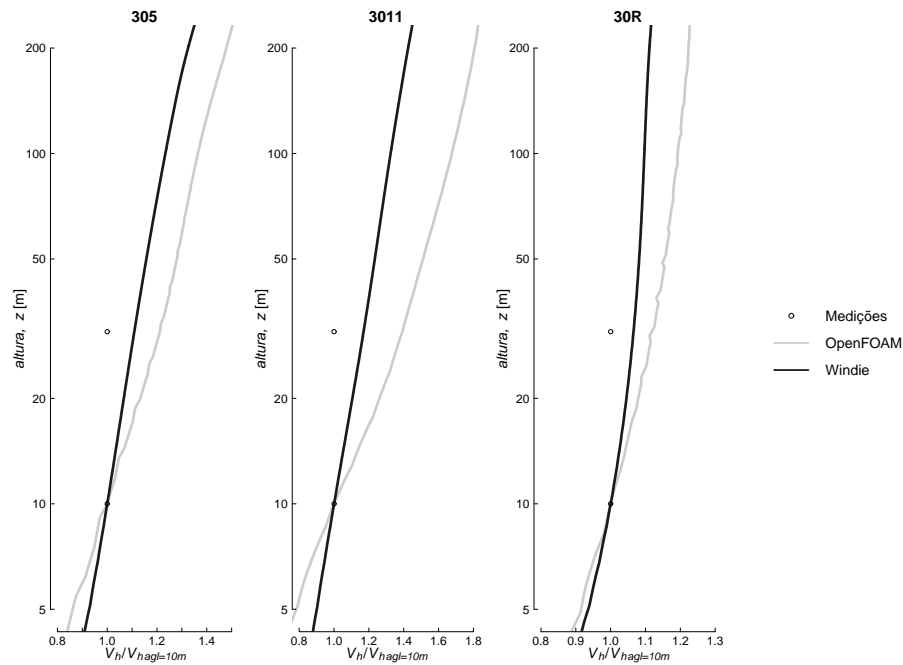


Figura 4.28: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 270°.

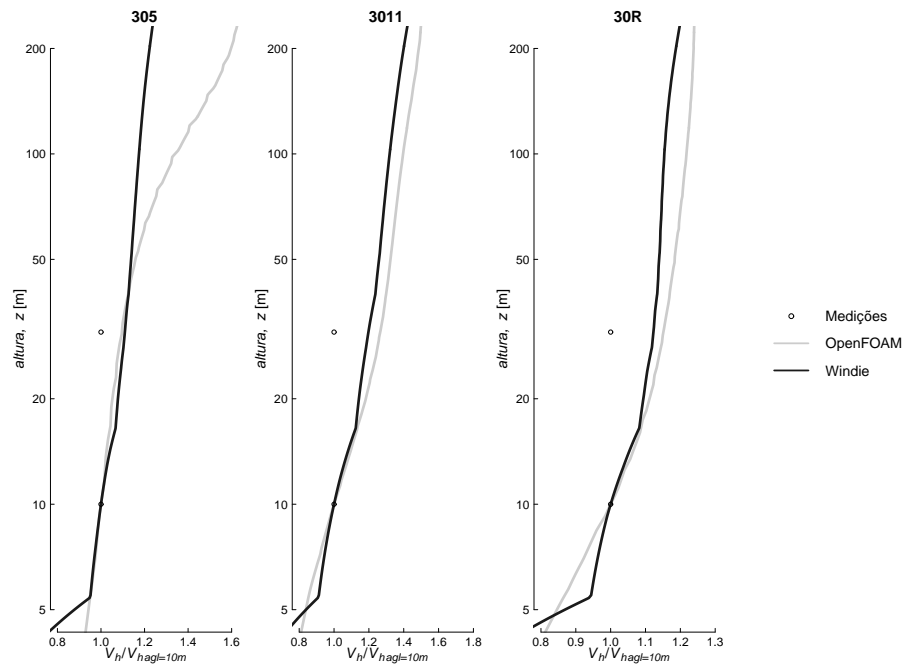


Figura 4.29: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 300°.

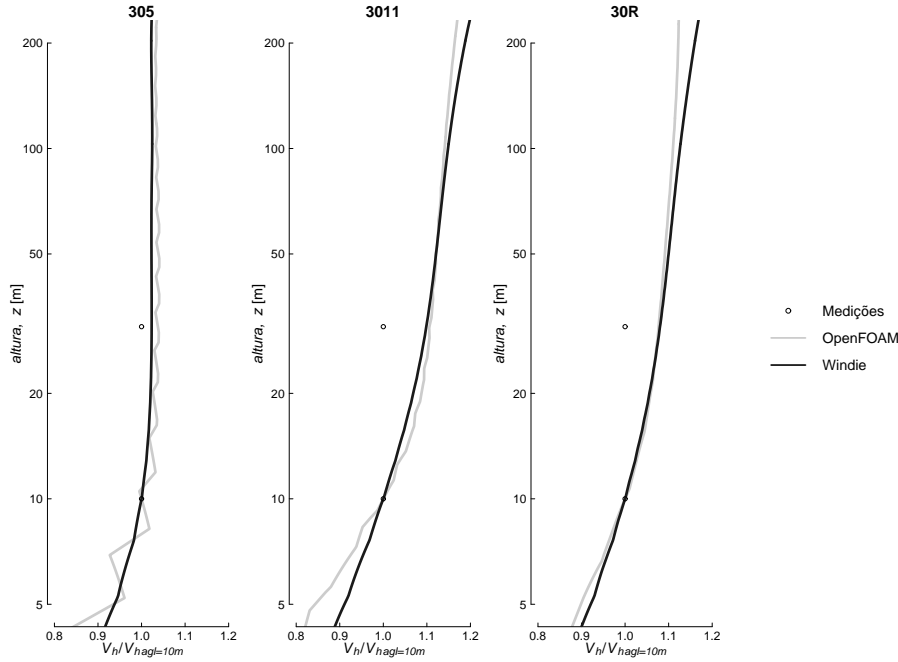


Figura 4.30: Perfil de velocidades adimensional, "Speed-up", usando como referência a velocidade a 10 m acima do solo. Direção 330°.

4.6.4 Comparação do campo de Turbulência

Na análise da turbulência feita a partir dos dados das medições, foram ignorados valores relativos a velocidades inferiores a 3 m.s^{-1} , tal como já foi anteriormente referido. Os dados acerca da turbulência medida foram inferidos a partir dos resultados do desvio padrão da velocidade horizontal (recorde-se, de amostragens de 10 minutos). Assim, para o cálculo da intensidade turbulenta foi usada a fórmula 4.2, sendo feita uma média de todos os valores de IT para a direção em estudo.

$$IT = \overline{\left(\frac{\sigma}{V_h} \right)}. \quad (4.2)$$

Para os resultados do *OpenFOAM* e o *Windie*, a intensidade turbulenta foi calculada usando a equação 4.3.

$$IT = \frac{\sqrt{\frac{2*k}{3}}}{V_h}. \quad (4.3)$$

A figura 4.31 representa o campo de turbulência simulado no *OpenFOAM* e a 4.32 o campo de turbulência simulado no *Windie* (valores de Intensidade Turbulenta). Podemos reparar que nas zonas mais próximas ao solo o valor de turbulência é maior no *Windie*. Após passagem do monte, o local onde ocorre maior turbulência é na sua esteira, mas

com maior acentuação na simulação feita pelo *OpenFOAM*. É de salientar que a Intensidade Turbulenta é mais localizada no *OpenFOAM*, enquanto no *Windle* apresenta um comportamento mais uniforme ao longo da topografia.

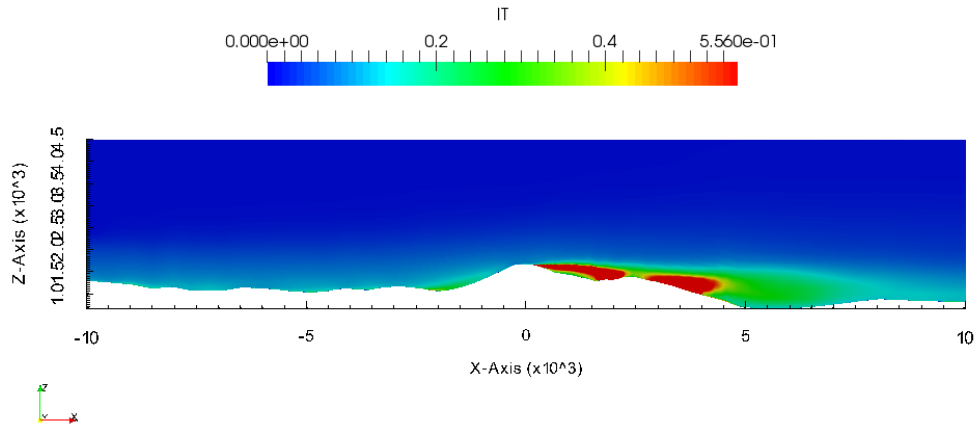


Figura 4.31: Campo de Intensidade Turbulenta ao longo da topografia. Corte na direção Norte-Sul, vento de 0°), dos resultados da simulação no *OpenFOAM*.

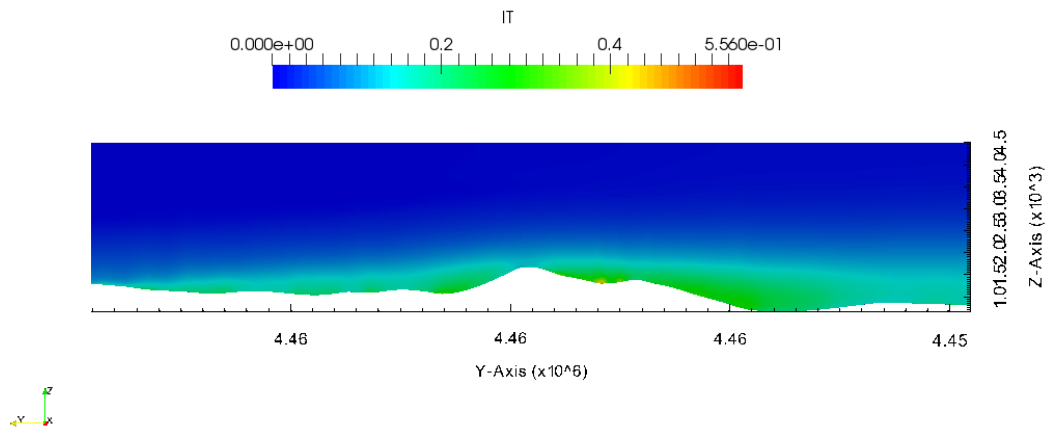


Figura 4.32: Campo de Intensidade Turbulenta ao longo da topografia. Corte na direção Norte-Sul, vento de 0°), dos resultados da simulação no *Windle*.

4.6.5 Comparação dos Perfis de Intensidade Turbulenta

Nas figuras 4.33 a 4.44 podem-se comparar os perfis de IT obtidos nas simulações com os valores medidos em cada mastro. Relembramos que o mastro 305 encontra-se localizado a Oeste, o 3011 é o mastro central e o 30R é o mastro situado a Este.

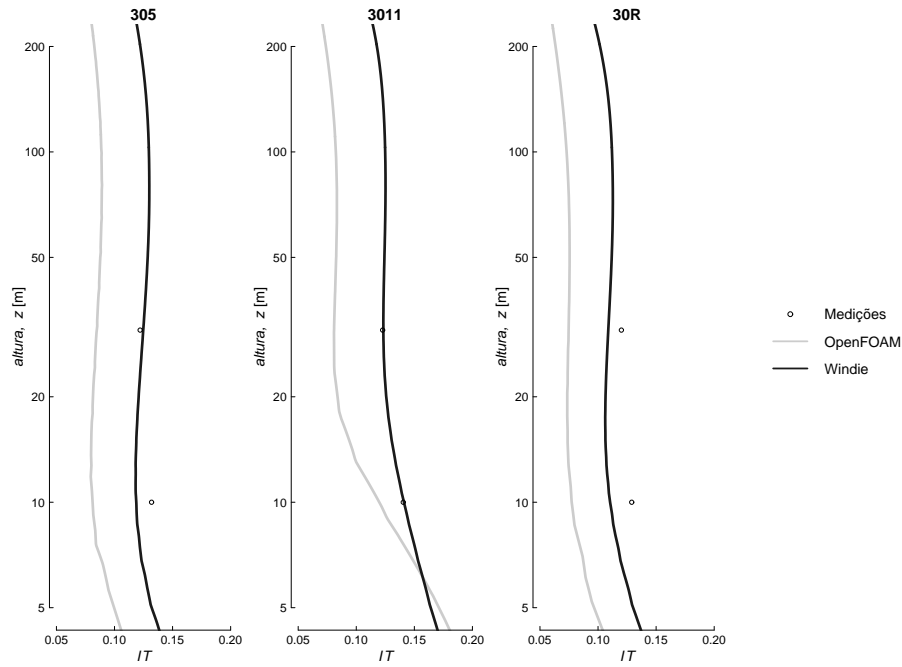
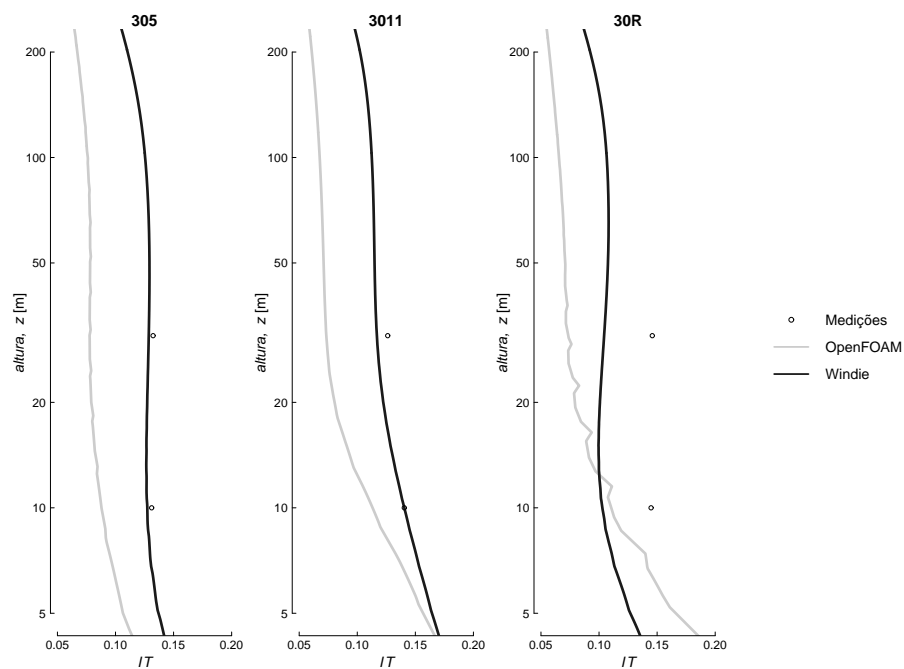
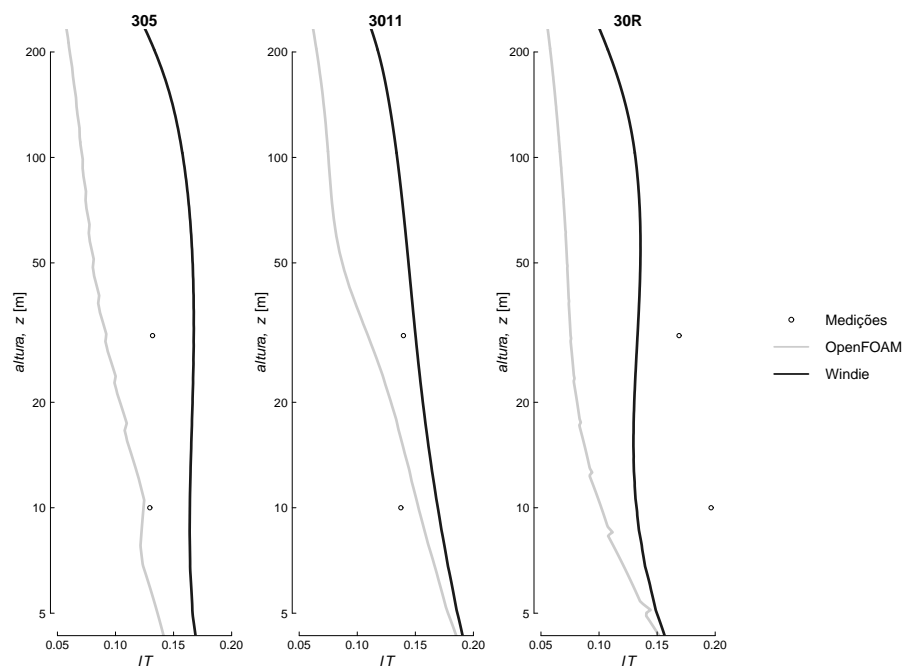


Figura 4.33: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 0° .

Figura 4.34: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 30° .Figura 4.35: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 60° .

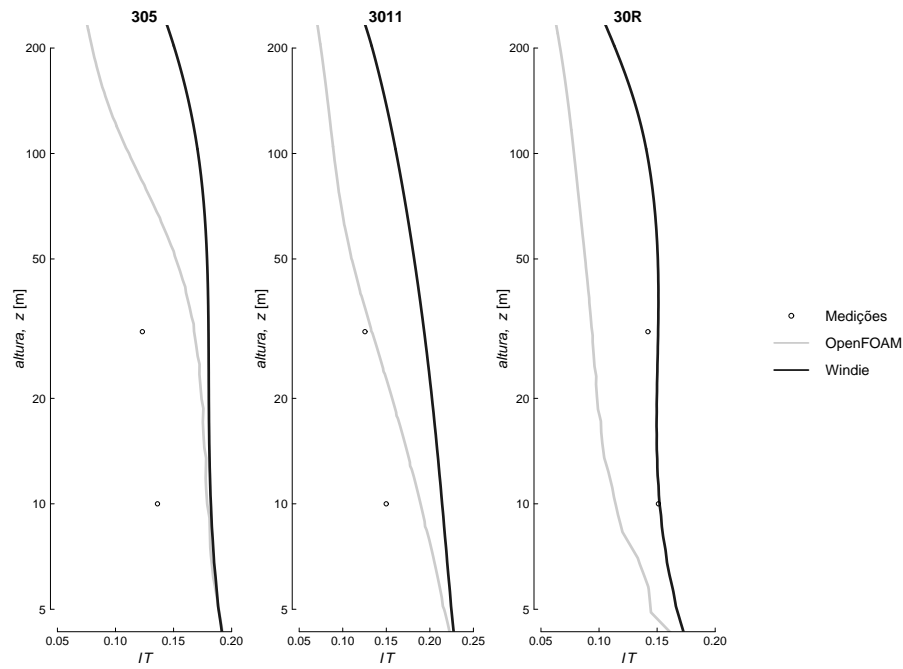


Figura 4.36: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 90° .

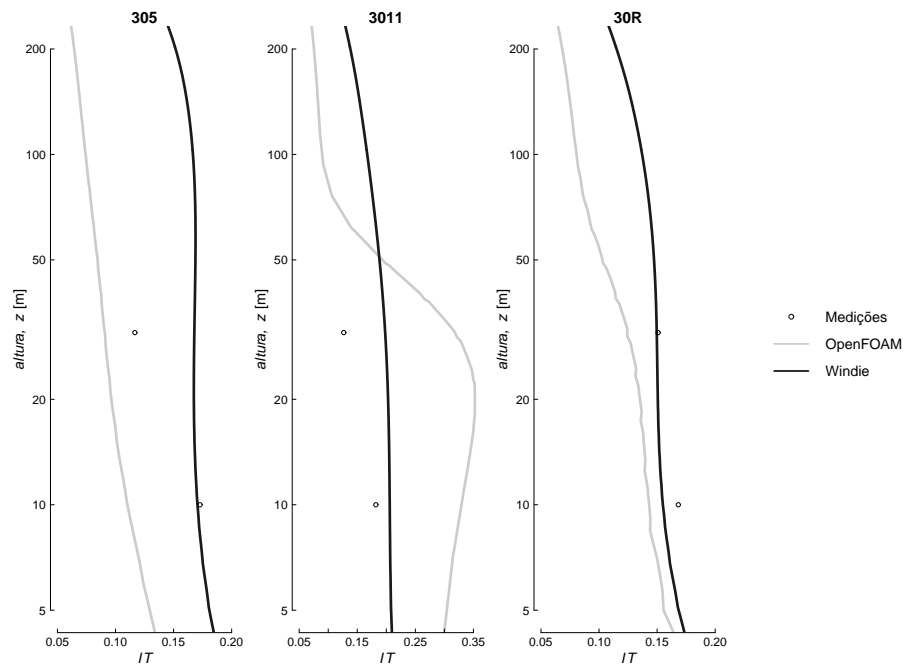
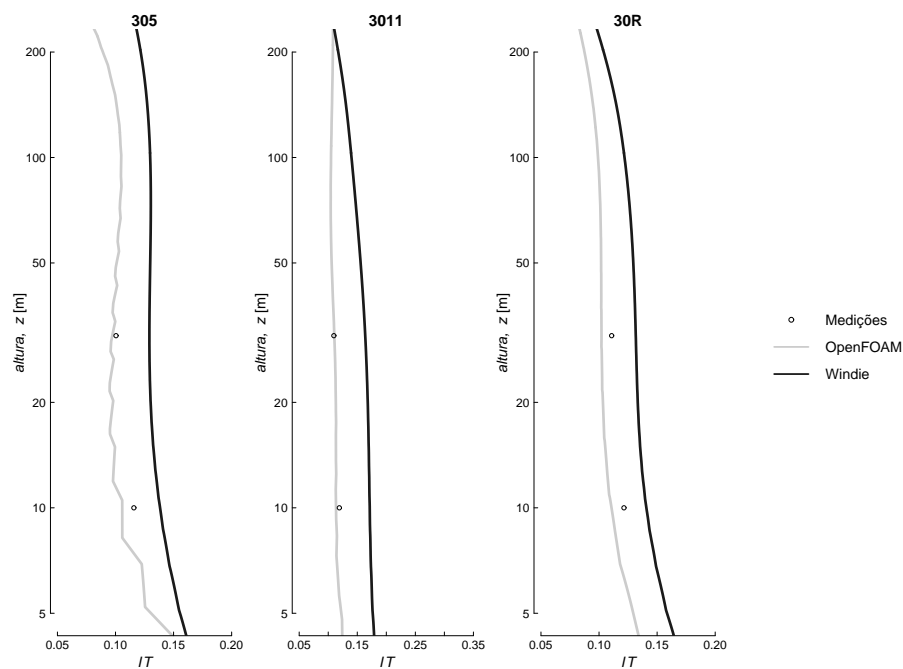
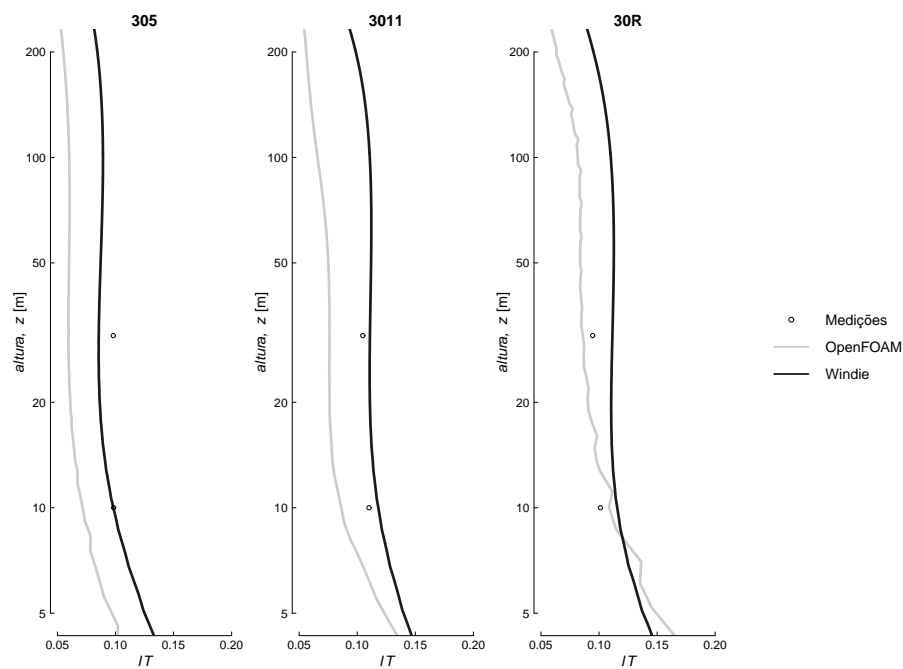


Figura 4.37: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 120° .

Figura 4.38: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 150° .Figura 4.39: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 180° .

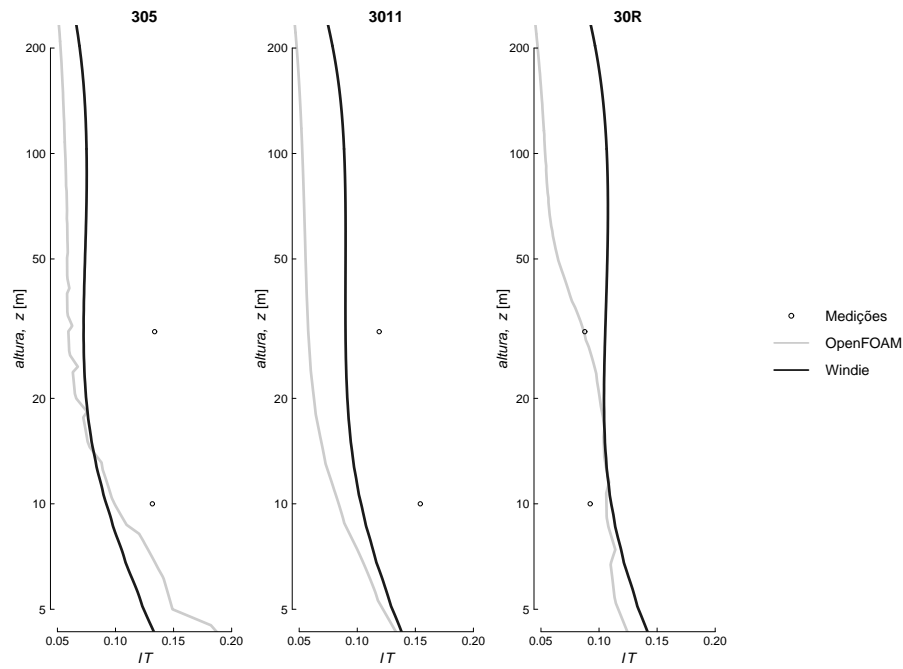


Figura 4.40: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 210° .

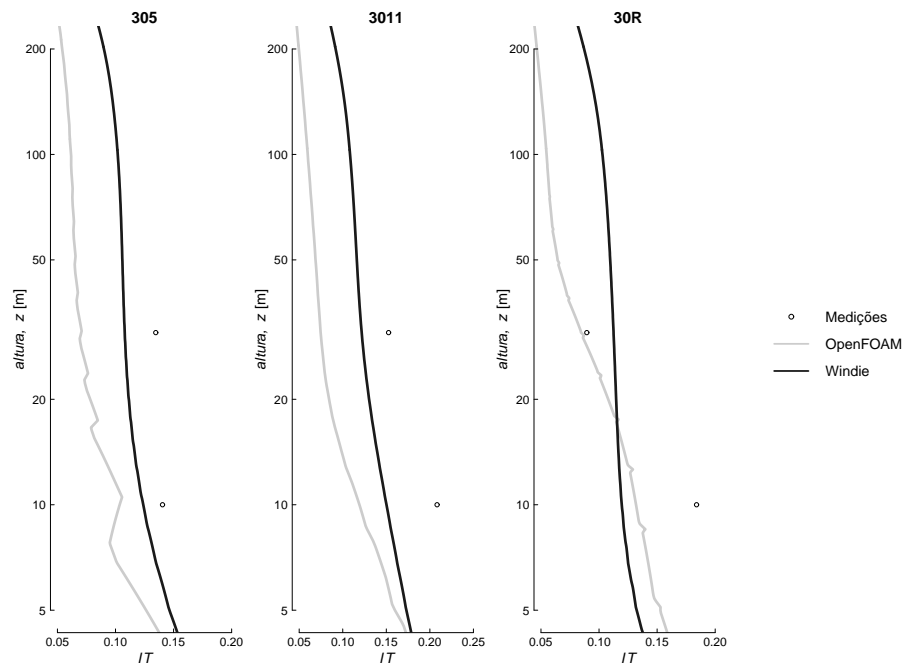


Figura 4.41: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 240° .

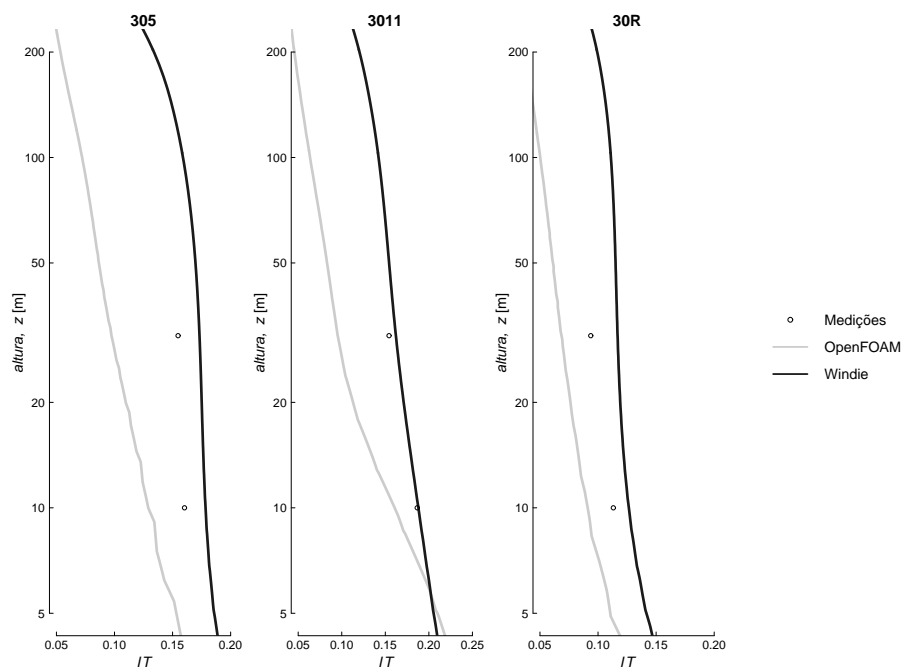


Figura 4.42: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 270° .

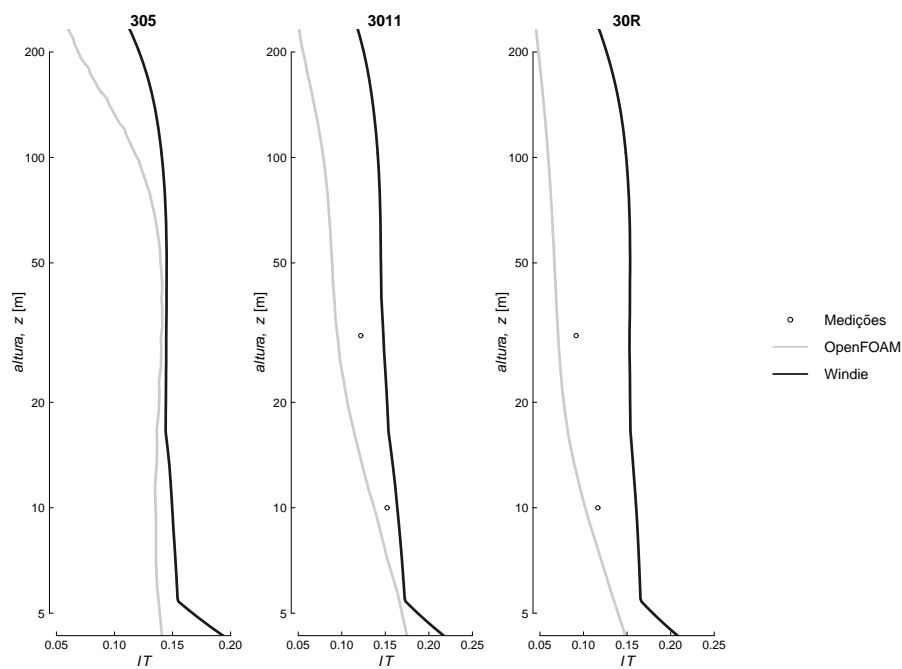


Figura 4.43: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 300° .

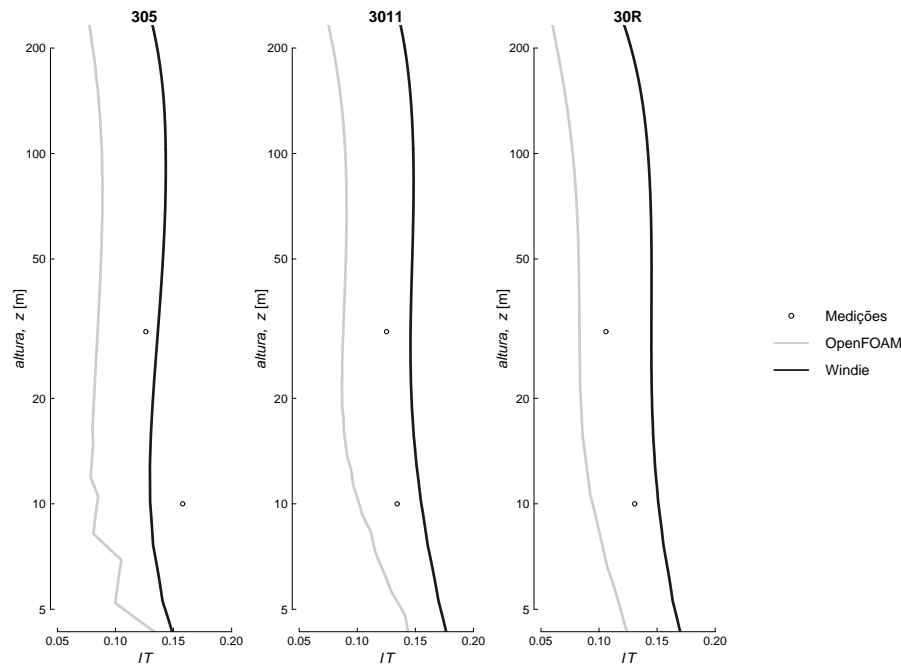


Figura 4.44: Perfil da Intensidade Turbulenta, IT . Direção 330° .

Pequena nota: Os resultados do *Windie* para a direção 300° , são dados retirados com uma malha mais espaçada na direção vertical junto ao solo. Isto deveu-se ao cálculo não convergir nas condições genéricas. Podemos ver em comparação nas figuras 4.45 e 4.46. Também para algumas direções, as simulações *Windie* apenas convergiram em modo transiente, sendo os resultados apresentados resultantes de valores médios num período de 10 minutos (tempo de simulação).

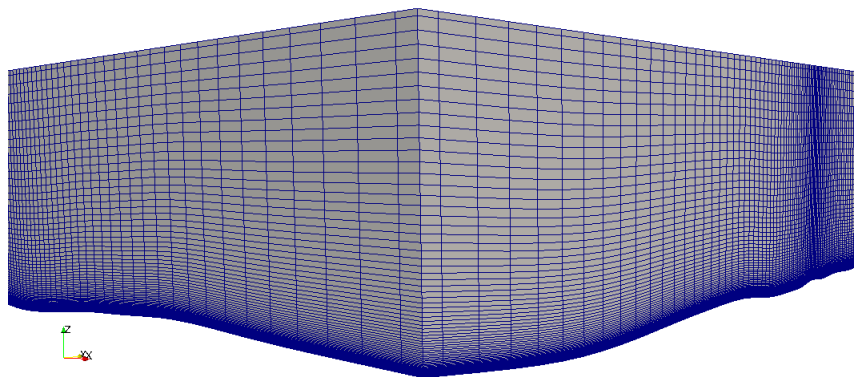


Figura 4.45: Malha final do *Windie* para a direção 000.

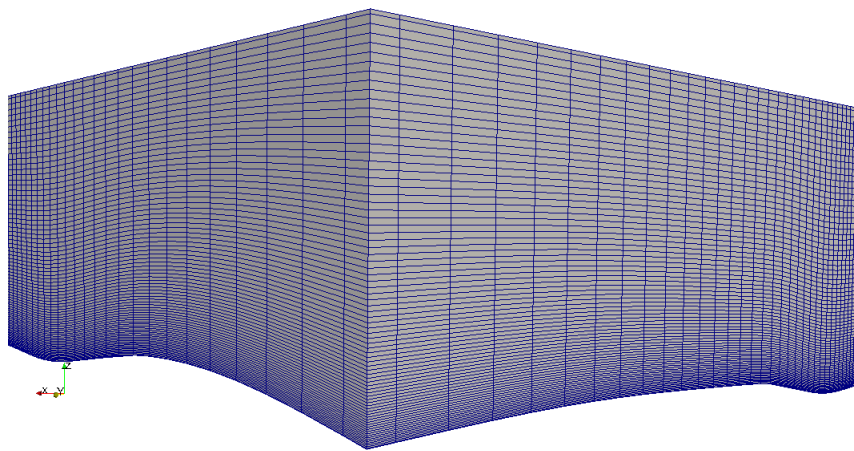


Figura 4.46: Malha final do *Windie* para a direção 300.

4.6.6 Zona de Recirculação na Esteira do Monte

Nas figuras seguntes, 4.47 e 4.48, pode-se observar o comportamento do vento nas esteira da montanha, para ventos oriundos de Norte e Noroeste. De notar a existência de uma típica zona de recirculação. São representadas linhas de corrente a passar pelas coordenadas dos três mastros. As figuras mostram também o campo de turbulência junto ao solo. Como pode ser visto a zona com maior turbulência ocorre após o topo do monte.

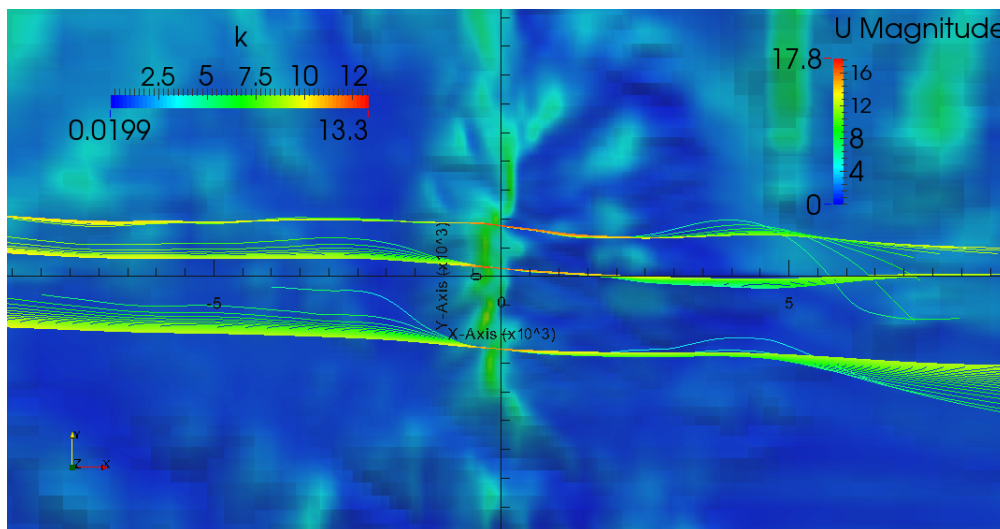


Figura 4.47: Dados de turbulência representado no solo e linhas de velocidade e direção do vento, para a direção 0° .

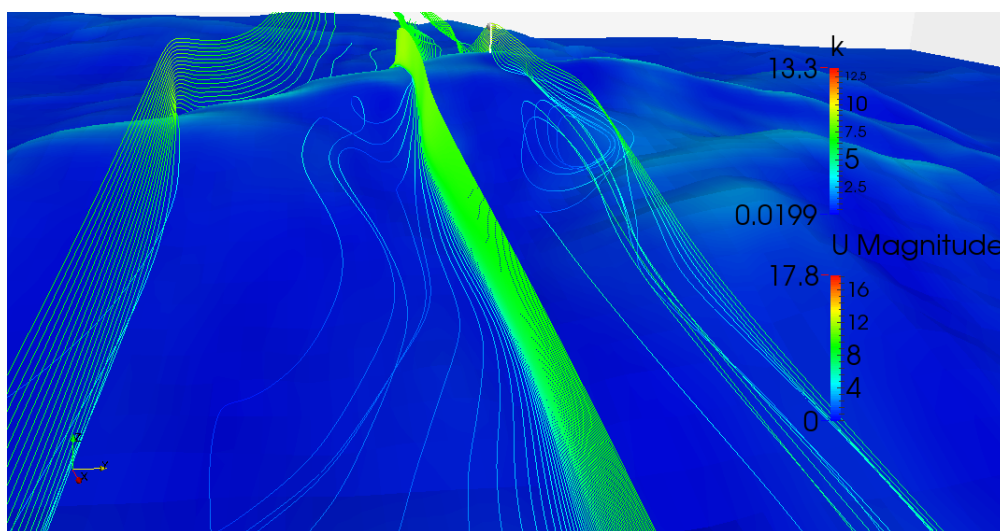


Figura 4.48: Dados de turbulência representado no solo e linhas de velocidade e direção do vento, para a direção 30° .

4.7 Discussão dos Resultados

Das imagens dos campos de velocidade e de turbulência não é possível fazer uma discussão comparativa dos resultados, pelo menos que possam tomar como referência as medições feitas no terreno. Apenas poderá ser feita uma análise qualitativa das mesmas. Em termos do campo de velocidades não existem diferenças significativas. No entanto, aparecem fortes discrepâncias nos valores da intensidade turbulenta na esteira do cimo da montanha. Esta é significativamente mais forte nos resultados do *OpenFOAM* que nos do *Windie*. Nas restantes zonas, nomeadamente junto ao solo, os valores de *IT* do *Windie* são geralmente superiores. Sendo este tipo de análise qualitativa por vezes discutível, abstermo-nos de nos alongar em mais considerações e de extrair grandes conclusões.

Já dos gráficos dos perfis de velocidade (*Speed-up*) e Intensidade Turbulenta é possível fazer uma análise que tem em consideração os resultados da campanha de medições.

Nos perfis de *Speed-up* é, no geral, notório que o *Windie* captura melhor a tendência revelada pelos anemómetros, enquanto os resultados do *OpenFOAM* são por vezes algo incertos e com tendências inesperadas. De qualquer forma, em várias ocasiões os resultados do *OpenFOAM* são satisfatórios.

Relativamente aos perfis de Intensidade Turbulenta ambos os softwares acompanham os resultados das medições de forma bastante satisfatória. Isto, apesar de, ocasionalmente, os resultados de um ou do outro poderem estar mais próximos dos valores dos anemómetros. Sublinhamos, no entanto, que existe uma maior variância nos formatos dos perfis extraídos do *OpenFOAM* relativamente aos resultados do *Windie*.

Um aspeto importante, e que tanto verifica nos perfis de *Speed-up* e de Intensidade Turbulenta é a presença de um "ruído" nos resultados do *OpenFOAM*. Este fator seria expetável no caso de a simulação não convergir. No entanto não foi essa a indicação do software, tornando difícil a deteção da origem deste fenómeno. Poderá, eventualmente tratar-se de ruído numérico (resultado da simulação), mas haverá também a hipótese de este "ruído" ter surgido no pós-processamento dos resultados. Não foi possível, até porque o tempo escasseou e não será fácil, detetar a origem deste problema.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

As técnicas de simulação CFD aplicadas ao estudo de escoamentos atmosféricos têm ainda um grande potencial de evolução no desenvolvimento de aplicações a estudos e projetos relacionados com a produção de energia eólica. Neste estudo quis-se contribuir com a aplicação de uma ferramenta *open source* a este tipo de estudos - o *OpenFOAM* - na sequência do trabalho prévio desenvolvido por [da Silva Azevedo \(2013\)](#). Para esse efeito comparou-se o desempenho desta ferramenta com o software *Windie* (com provas dadas nesta área), simulando vários regimes (direções) de vento sobre uma topografia medianamente complexa situada na Grécia, através dos valores de *speed-up* e intensidade turbulenta. Na comparação foram utilizados como referência resultados de medições efetuadas ao longo de uma campanha de vários meses, em 3 mastros instalados no local.

A partir da análise dos resultados obtidos para os valores de *speed-up* e intensidade turbulenta, concluímos que o software *OpenFOAM* obteve resultados finais bastante aceitáveis e até próximos do reais lidos pelos anemómetros. No entanto, e globalmente, os resultados das simulações efetuadas no *Windie* apresentaram melhor qualidade.

Dos resultados o *OpenFOAM* tem capacidades satisfatórias na sua aplicação a esta área, havendo no entanto ainda bastante terreno para desenvolver e explorar.

5.2 Trabalho futuro

Num trabalho futuro, dever-se-á continuar a aprofundar a validação da aplicação do *OpenFOAM* na simulação CFD para estudo de potencial eólico.

Será também de interesse fazer um estudo sobre as possibilidades de gerar e aplicar diferentes tipos malhas, com diferentes configurações para dados topográficos e comparar resultados obtidos e tempos de cálculo.

Outra área de possível interesse futuro seria evoluir no sentido de acoplar dados atmosféricos obtidos em simulações de mesoescala diretamente para as condições de fronteira do *OpenFOAM*.

Bibliografia

- Beljaars, A. C. M., Walmsley, J. L., and Taylor, P. A. (1987). A mixed spectral finite-difference model for neutrally stratified boundary-layer flow over roughness changes and topography. *Boundary-Layer Meteorology*, 38:273–303.
- da Silva Azevedo, J. M. (2013). Development of procedures for the simulation of atmospheric flows over complex terrain, using openfoam. *Tese de Mestrado, ISEP*.
- ecmwf. Boundary layer.
- et al., K. (2000). Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation. *Boundary-Layer Meteorology*, 94:5–21.
- F. A. Castro, J. M. L. M. P. and Lopes, A. S. (2003). Simulation of the askervein flow. part 1: Reynolds averaged navier-stokes equations (k - ε turbulence model). *Boundary-Layer Meteorology*.
- Gasch, R. and Twele, J. (2002). Wind power plants: Fundamentals, design, construction and operation. *Springer*.
- gfortran. gfortran.
- Gresho, P. and Lee, R. (1904). Uber flussigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung. *Intern. Math. Kongr.*, III.
- Jackson, P. S. and Hunt, J. C. R. (1975). Turbulent wind over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101:929–955.
- Launder, B. E. and Sharma, B. I. (1974). Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1:131–138.
- Martinez, B. (2011). Wind resource in complex terrain with openfoam. *Tese, Technical University of Denmark*.
- Mason, P. J. and King, J. C. (1985). Measurements and predictions of flow and turbulence over isolated hill of moderate slop. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111:617–640.

Oke, T. R. *Boundary Layer Climates*.

OpenFOAM. Openfoam.

Palma, J. M. L. M., Castro, F. A., Ribeiro, L. F., Rodrigues, A. H., and Pinto, A. P. (2003). Simulation of the askervein flow. part 1: Reynolds averaged navier stokes equations (k - ε turbulence model). *Boundary-Layer Meteorology*.

Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.

R. R project.

Raithby, G. D., Stubley, G. D., and Taylor, P. A. (1987). The Askervein hill project: A finite control volume prediction on three-dimensional flows over the hill. *Boundary-Layer Meteorology*, 39:107–132.

Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.

Tapia, X. P. (2009). Modelling of wind flow over complex terrain using openfoam. *Tese, University of Gavle*.

Taylor, P. A. (1977). Some numerical studies of surface boundary-layer flow over gentle topography. *Boundary-Layer Meteorology*, 11:439–465.

Taylor, P. A. and Lee, R. J. (1987). Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features. *Climatol. Bull.*, 18:3–23.

Taylor, P. A. and Teunissen, H. W. (1985). The Askervein Hill Project: Report on the Sept./Oct. 1983, Main Field Experiment, Research Report MSRB-84-6. Technical report, Meteorological Services Research Branch Atmospheric Environment Service 4905 Dufferin Street, Downsview, Ontario, Canada M3H 5T4.

Teunissen, H. W., Shokr, M. E., Bowen, A. J., Wood, C. J., and Green, D. W. R. (1987). The Askervein hill project: Wind tunnel simulations at three length scales. *Boundary-Layer Meteorology*, 40:1–29.

Walmsley, J. L., Salmon, J. R., and Taylor, P. A. (1982). On the application of a model of boundary-layer flow over low hills to real terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 23:17–46.

Windie. Windie.

Wyngaard, J. and Kosovic, B. (2010). Turbulence in the atmosphere. *Cambridge University Press*.

Apêndice A

Pastas, ficheiros e seu conteúdo Pré-processamento, Pós-processamento e OpenFOAM

A.1 Disposição das pastas e ficheiros

Disposição das pastas e ficheiros do OpenFOAM com a ferramenta do [da Silva Azevedo \(2013\)](#)

```
<case>
|-- 0
| |-- dat
| | |-- epsilon.dat
| | |-- k.dat
| | |-- omega.dat
| | |-- u.dat
| | |-- z0.dat
| | '-- z.dat
| |-- epsilon
| |-- k
| |-- nut
| |-- omega
| |-- p
| |-- U
| |-- z
| '-- z0
|-- constant
| |-- polyMesh
| | '-- blockMeshDict
| |-- RASProperties
| '-- transportProperties
|-- _postproc
| |-- dat
| | |-- agl.dat
| | |-- aglsurf.dat
```

```

| | |-- gl.dat
| | |-- vprfl1.dat
| | |-- vprfl2.dat
| | |-- vprfl3.dat
| |-- _postprocDict
| |-- src
| | '--- write_sample.src
| | '--- write_sample.f90
| |-- vtk
| | |-- aglsurf.vtk
| | |-- agl.vtk
| | |-- vprfl1.vtk
| | |-- vprfl2.vtk
| | |-- vprfl3.vtk
| | '--- vprfl1.vtk
| '--- write_sample
|-- _preproc
| |-- plot
| |-- _preprocDict
| |-- src
| | |-- write_bCs.src
| | | '--- write_bCs.f90
| | |-- write_blockMeshDict.src
| | | '--- write_blockMeshDict.f90
| | |-- write_turbulenceProperties.src
| | | '--- write_turbulenceProperties.f90
| | '--- write_z0.src
| | '--- write_z0.f90
| |-- utils
| | |-- mesh_calc.m
| | '--- terraintoolcsv2raw.m
| |-- vtk
| | '--- topo_nrot.vtk
| |-- write_bCs
| |-- write_blockMeshDict
| |-- write_turbulenceProperties
| '--- write_z0
'--- system
|-- controlDict
|-- fvSchemes
|-- fvSolution
'--- sampleDict

```

A.2 Conteúdo dos ficheiros da pasta /_preproc

Modificações e parâmetros usados no ficheiro `_preprocDict`:

```

                                _preprocDict
#####
# CONFIGURATION OF PREPROCESSING TOOLS FOR OpenFOAM #
#####

# write_blockMeshDict #
sky      = 4500. # Height ASL of computational domain top patch
           [m]
nz       = 030   # Number of cells in z direction
R        = 194.76# R expansion factor

# write_bCs #
zrs      = 10.   # Reference height [m]
ustar    = 0.40  # Friction velocity [m/s]
z0i      = 0.03  # Reference aerodynamic roughness length [m]
delta    = 1000. # Height of boundary layer [m]
kv       = 0.41  # vonKarman constant
cmu      = 0.033 # kEpsilon model coefficient (betaStar kOmega)

# write_z0 #
z0u      = 0.03  # Uniform aerodynamic roughness length [m]
opt      = 1     # 1 - Uniform roughness mode
                # 2 - Roughness map in rough_nrot.vtk
                # 3 - Roughness defined by an equation in
                write_z0.f90

# write_turbulenceProperties #
model    = 13    # kEpsilon: 11-Calibrated, 12-Standard, 13-
                Atmospheric
                # RNGkEpsilon: 21-Original, 22-Modified, 23-
                Atmospheric
                # RealizableKE: 3
                # kOmega: 4
                # kOmegaSST: 5

```

A.3 Conteúdo dos ficheiros da pasta */surf*

Modificações e parâmetros usados no ficheiro *preproc.cfg*:

```

                                preproc.CFG

#GSURF
nit                =          1766                !x-dimension of
    topo data
njt                =          1766                !y-dimension of
    topo data
cofx               =          50.0                !cofx
cofy               =          50.0                !cofy
xmin               =        -10000.0              !xmin
xmax               =        +10000.0              !xmax
ymin               =        -10000.0              !ymin
ymax               =        +10000.0              !ymax
alfalayer          =          2500.0              !alfa layer
npassfilter        =           15                 !npassfilter
:

#GROUG
nir                =          1766                !x-dimension of
    roughness data
njr                =          1766                !y-dimension of
    roughness data

#MESH ROTATION
rot                =          360.0                !wind direction
xcentre            =        549135.0              !x-coordinate of
    site centre
ycentre            =        4459529.0              !y-coordinate of
    site centre

#MESOSCALE
wrf_file           =    wrfout.nc                !file to be read by
    wsurf and wprep
wrfM_data          =    wrfdata.nc                !file to be read by
    wprepM
nim                =           67
njm                =           67
nkm                =           31
utm_zone           =           29
xcentrem           =    582394.1

```

```
ycentrem          = 4400685.6
init_wrf_step      =      001
iend_wrf_step      =      1000
xutm_targetpoint   = 594292.96      !x-utm monitoring
    point coordinates
yutm_targetpoint   = 4412815.06      !y-utm monitoring
    point coordinates
zagl_targetpoint   =      83.0       !zagl  monitoring
    point coordinates
icontrol           =      1         !1 - all the proc 2
    - only interpolation

#GCANO
nic                =      1601       !x-dimension of
    forest data
njc                =      1601       !y-dimension of
    forest data

#GMESH
zmax               =      4500.0     !top boundary
    altitude
cofz               =      1.00       !height of the first
    CV above ground level
zpz0               =      0         !add z0 to z
```

Modificações e parâmetros usados no ficheiro windie.cfg:

```

                                windie.CFG

#####
# WINDIE.CFG - WINDIE Configuration File      #
#                                              #
# Comment line using '#' on first column      #
#####

# GRID_DIMENSIONS
nig          = 101          #
njg          = 101          #
nkg          = 81           #

# DOMAIN PARTITION
autopart     = 1            #
nid          = 03           #
njd          = 03           #
nkd          = 01           #

# STEADY-TRANSIENT
recalc       = 0            #
itrans       = 0            #
sormax       = 0.00085      #
nitermax     = 9000000      #
nnitermax    = 003          #
dtime        = 00.500       #
timemax      = 1000000.0    #
ivduwrite    = 100          # deprecated
istwrite     = 100          #
itrwrite     = 300          #
irfwrite     = 2400         #
outputlevel  = 1            # 0->stealth,
    only Rfs RRs, 1-> windie.res, 2-> all

# GROUND_COVER
iroug        = 0            #
roug0        = 0.03         # check
    default value of roug.dat
icano        = 0            #

# THERMODYNAMICS
itemp        = 0            #

```

```

iprandtl      = 1                      # 0 -
      constant Prandtl, 1 - variable Prandtl
prt0          = 0.74                  # contant
      Prandtl number
t00           = 300.0                 #
fbv           = 0.01                  #
cpp           = 1005.                  #

# BOUNDARY CONDITIONS
ibcs          = 0                     # 0-
      synthetic 1-coupled
ibcsk         = 0                     # 0- without
      k coupling 1- with k coupling

# MESOSCALE COUPLING
dtimemeso     = 1200.                 # time between
      WRF output's #

# CORIOLIS
icoriolis     = 1                     #
fcoriolis     = 8.83e-5               #

# SPONGES
alfavu        = 0.010                 #
alfave        = 0.010                 #
alfahu        = 0.010                 #
alfahe        = 0.010                 #
alfal         = 0.010                 #
xd            = 0500.0                 #
yd            = 0500.0                 #
zd            = 3500.0                 #

# PHYSICS
density       = 1.205                 #
viscos        = 1.85E-5               #
ustar         = 0.40                  #
deltam        = 1500.0                 #
cmu0          = 0.033                 #
cappa         = 0.40                  #
grav          = 9.8                   #

# TURBULENCE MODELS

```

```
iturbmod      = 1                                #1-> ke, 2->
keREALIZ, 3-> keRNG, 4-> tke, 5-> Smagorinsky

# NUMERICAL PARAMETERS
iconvscheme    = 4                                #1-> upwind,
2-> 2th order 4-> 4th order
iordempres     = 3                                #1-> linear
3-> 3 order

# MONITORING POINT
#xmon          = 727297.9                          #
#ymon          = 4746316.0                          #
#zmon          = 050.0                              #
#imon          = 22                                  #
#jmon          = 22                                  #
#kmon          = 13                                  #

# OUTPUT CONTROL
ignuplot       = 0                                  #
```


A.4 Ficheiros de configuração da pasta */system*

Na Pasta *system* o ficheiro `sampleDict` tem de ler as coordenadas `.vtk` dos mastros e superfície `agl`, resultando então:

```
sampleDict

fields
(
    k
    U
);
// Fields to sample.

sets
(
    agl
    {
        type            cloud;
        axis             xyz;
        points           (#include "../_postproc/dat/agl.dat");
    }

    aglsurf
    {
        type            cloud;
        axis             xyz;
        points           (#include "../_postproc/dat/aglsurf.dat");
    }

    vprfl1
    {
        type            cloud;
        axis             xyz;
        points           (#include "../_postproc/dat/vprfl1.dat");
    }

    vprfl2
    {
        type            cloud;
        axis             xyz;
        points           (#include "../_postproc/dat/vprfl2.dat");
    }
}
```

```
vprfl3
{
    type          cloud;
    axis          xyz;
    points        (#include "../_postproc/dat/vprfl3.dat");
}
);
```

Ficheiro que contém os esquemas convetivos, resultando então:

fvSchemes

```

ddtSchemes
{
    default            steadyState;
}

gradSchemes
{
    default            Gauss linear;
    grad(p)            Gauss linear;
    grad(U)            Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default            none;
    div(phi,U)         Gauss QUICKV;
    div(phi,k)         Gauss upwind;
    div(phi,epsilon)   Gauss upwind;
    div(phi,R)         Gauss upwind;
    div(R)             Gauss linear;
    div(phi,nuTilda)   Gauss upwind;
    div((nuEff*dev(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default            none;
    laplacian(nuEff,U) Gauss linear corrected;
    laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
    laplacian(DkEff,k) Gauss linear corrected;
    laplacian(DepsilonEff,epsilon) Gauss linear corrected;
    laplacian(DREff,R) Gauss linear corrected;
    laplacian(DnuTildaEff,nuTilda) Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default            linear;
    interpolate(U)     linear;
}

```

```
}

snGradSchemes
{
    default          corrected;
}

fluxRequired
{
    default          no;
    p                ;
}
```

CrITÉRIOS de convergência para processamento:

fvSolution

```
solvers
{
    p
    {
        solver          GAMG;
        mergeLevels      1;
        smoother         DIC;
        preconditioner    FDIC;
        agglomerator      faceAreaPair;
        nCellsInCoarsestLevel 50;
        tolerance        1e-05;
        relTol            0.01;
    }

    U
    {
        solver          PBiCG;
        preconditioner    DILU;
        tolerance        1e-05;
        relTol            0.1;
    }

    k
    {
        solver          PBiCG;
        preconditioner    DILU;
        tolerance        1e-05;
        relTol            0.1;
    }

    epsilon
    {
        solver          PBiCG;
        preconditioner    DILU;
        tolerance        1e-05;
        relTol            0.1;
    }

    R
    {
```

```
        solver          PBiCG;
        preconditioner   DILU;
        tolerance        1e-05;
        relTol           0.1;
    }

    nuTilda
    {
        solver          PBiCG;
        preconditioner   DILU;
        tolerance        1e-05;
        relTol           0.1;
    }
}

SIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors 0;

    residualControl
    {
        p                1e-2;
        U                1e-3;
        "(k|epsilon|omega)" 1e-3;
    }
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
        p                0.3;
    }
    equations
    {
        U                0.7;
        k                0.7;
        epsilon          0.7;
        R                0.7;
        nuTilda          0.7;
    }
}
```

A.5 Ficheiros de configuração da pasta */constant*

Na Pasta *constant* temos o ficheiro *sampleDict* com as constantes de escoamento $\kappa - \epsilon$ atmosférico:

```

                                RASProperties
RASModel          kEpsilon;

turbulence        on;

kEpsilonCoeffs
{
    Cmu            0.0330;
    C1             1.4400;
    C2             1.9200;
    sigma_k        1.0000;
    sigmaEps       1.8500;
}
```


Apêndice B

Código R

B.1 Disposição das pastas e ficheiros

Código em R que nos dá em "coordenadas OpenFOAM" a posição dos anemómetros para várias direções da malha.

RASProperties

```
rot_deg=330.0

#####

Centro_X = 549135.0
Centro_Y = 4459529.0

X_30R = 5.500308125E+05 -Centro_X
Y_30R = 4.459632500E+06 -Centro_Y

X_305 = 5.478823750E+05 -Centro_X
Y_305 = 4.459612000E+06 -Centro_Y

X_3011 = 5.492740000E+05 -Centro_X
Y_3011 = 4.459507000E+06 -Centro_Y

rot = -rot_deg *pi/180.0

NovoX_30R = X_30R * cos(rot) + Y_30R *sin(rot)
NovoY_30R = -X_30R * sin(rot) + Y_30R *cos(rot)
```

```
NovoX_305 = X_305 * cos(rot) + Y_305 *sin(rot)
NovoY_305 = -X_305 * sin(rot) + Y_305 *cos(rot)

NovoX_3011 = X_3011 * cos(rot) + Y_3011 *sin(rot)
NovoY_3011 = -X_3011 * sin(rot) + Y_3011 *cos(rot)

NovoX_30R_2 = -NovoY_30R
NovoY_30R_2 = NovoX_30R

NovoX_305_2 = -NovoY_305
NovoY_305_2 = NovoX_305

NovoX_3011_2 = -NovoY_3011
NovoY_3011_2 = NovoX_3011

cat("Direcao do vento =", rot_deg, "\n",
    NovoX_30R_2, NovoY_30R_2, "\n",
    NovoX_305_2, NovoY_305_2, "\n",
    NovoX_3011_2, NovoY_3011_2)
```